

FNAL 8 GeV 陽子ビームのための広ダイナミックレンジをもつ ビームハローモニターの開発状況

STATUS OF DEVELOPMENT OF A WIDE DYNAMIC RANGE BEAM HALO MONITOR FOR THE FNAL 8 GeV PROTON BEAM

佐々木知依^{#, A)}, 橋本義徳^{A)}, 大森千広^{A)}, 三橋利行^{A)}, 佐藤洋一^{A)}, 手島昌己^{A)}, 外山毅^{A)}, 魚田雅彦^{A)},
Ainsworth Robert^{B)}, Babacan Betiyar^{B)}, Schreckenberger Adam^{B)}, Murphy Martin^{B)}
Tomoi Sasaki^{#, A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Toshiyuki Mitsuhashi^{A)}, Yoichi Sato^{A)},
Masaki Tejima^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Masahiko Uota^{A)}, Robert Ainsworth^{B)}, Betiyar Babacan^{B)},
Adam Schreckenberger^{B)}, Martin Murphy^{B)}
A) KEK, B) FNAL

Abstract

KEK has been developing a wide dynamic range halo monitor for the FNAL 8 GeV proton beam at the FNAL request, which based on the halo monitor for the 3 GeV proton beam at J-PARC. The intensity per bunch of the 8 GeV beam at FNAL is more than two orders of magnitude lower than that of J-PARC. The manufacturing of the device has been completed, and the large-aperture optics are now being tuned and tested at the test bench in J-PARC. This paper reports the outline of the device and the optics tuning.

1. はじめに

FNAL では陽子ビーム入射器のアップグレードが進行しており(PIP-II[1])、これに合わせて8 GeV BoosterからRecycler Ring へのビーム輸送ラインにおいてのビームハロー診断とその装置開発が計画された。

一方、J-PARC では MR へのビーム入射路において Optical Transition Radiation(OTR)と蛍光(FL)を用いた2次元ビームプロファイルモニター(OTR/FL モニター)が運用されている。これは、チタンフォイルからの OTR とアルミナセラミックスからの蛍光の 2 種類の光を利用することでビームコアとビームハローを同時に測定することができ、そのダイナミックレンジは 6 桁を達成している。[2, 3]

そのような背景から FNAL はビームハローモニターの開発を KEK に依頼した。これに応じて、J-PARC のビームハロー診断技術を FNAL に導入することにした。測定対象の FNAL のビームは J-PARC と比較して低強度($\leq 1/100$)、かつサイズが小さい($\leq 1/4$)。この条件で J-

PARC と同じ 6 桁程度でのビームプロファイル測定を目標に設計を行なった[4, 5]。KEK で開発中の J-PARC MR 用の OTR/FL モニター2 号機[6, 7]に採用した 2 次光学系と光検出部のテクニクを転用することで、FNAL のハローモニターでも 6 桁のダイナミックレンジを達成できる見込みである。装置は KEK が設計し、日本国内で製作した。現在は J-PARC のテストベンチにおいて、装置の真空容器に格納される大口径光学系の光学調整と特性評価を進めている。その後、装置は FNAL に輸出され 2026 年夏に FNAL の 8 GeV ビーム輸送路(Fig. 1 赤枠内)にインストールされる予定である。

本論文では、FNAL ハローモニターの設計と開発状況、特に大口径光学系の調整について述べる。

2. 装置の設計

本セクションでは装置の設計の概要を述べる[4, 5]。

2.1 測定のコンセプト

測定原理は J-PARC OTR/FL モニター[2, 3]と同様である。フォイルターゲットの構成を Fig. 2 に示す。ビームコア部をチタンフォイルからの OTR、ビームハロー部をア



Figure 1: FNAL's accelerator system and the installation location of the FNAL Halo Monitor.

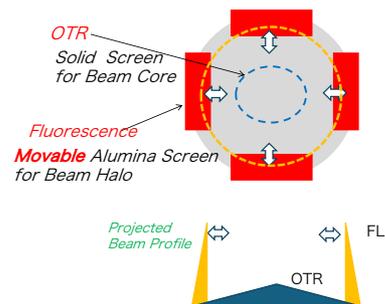


Figure 2: Target configuration.

tomoi.sasaki@kek.jp

ルミナセラミックスからの蛍光で測定する。アルミナを採用しているのは、その厚みを 0.5 mm としたときに、蛍光の光量がチタンからの OTR に比べて約 1300 倍多く[2]、極めて微弱なハロー部の測定に適しているためである。

これらのターゲットから放出される光は、真空チャンバ内に格納された大口径オフナー光学系を通してディフューザスクリーンでビームイメージとして結像する。この像を 2 stage MCP のイメージインテンシファイア (I.I.) を用いて、バンチに時間ゲートを掛けて光量を増幅し、それを 70 dB ゲインの CMOS カメラで撮影する。

2.2 FNAL と J-PARC のビームの違い

FNAL と J-PARC の測定するビーム条件の違いを Table 1 に示す。FNAL のビームは J-PARC のビームに対して、バンチあたりのビーム強度が、1/100 以下であり、サイズが 1/4 程度に小さいことが特徴である。尚、表中の J-PARC のビーム強度は、6 桁のダイナミックレンジで測定できる最低の強度を示した (Fig. 3 のピーク値も同じ)。また、Fig. 3 はガウシアンビームを仮定した時の FNAL と J-PARC それぞれのビーム密度のプロファイルである。J-PARC のピークを 1 とすれば、FNAL のピークは 0.08 [3] である。つまり、J-PARC と同じ測定感度であるとき、測定される FNAL の光強度は J-PARC より 1 桁程度小さい。この条件下で、FNAL でも J-PARC と同じ 6 桁のダイナミックレンジを目標にして光学系の設計を行った。

Table 1: Beam Conditions of J-PARC's and FNAL's

	Beam Energy [GeV]	Beam Intensity [p/bunch]	Beam Size (σ) [mm]	Lorentz Factor γ
J-PARC	3	1×10^{13}	10	4.2
FNAL	8	5×10^{10}	2.5	9.5

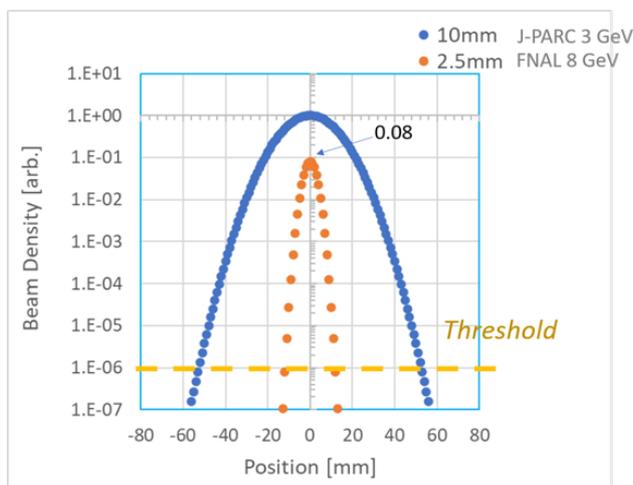


Figure 3: Beam-bunch density profiles of J-PARC and FNAL assuming gaussian beam.

2.3 FNAL 用オフナー光学系

ターゲットから放射される OTR の角度分布は、ピークを持つことが特徴である。そのピーク広がり、ローレンツ因子 γ (Table 1) を用いて、 $2/\gamma$ rad である[2]。この広がり角は、 $\gamma=4.2$ の J-PARC では $\pm 13.5^\circ$ であるが $\gamma=9.5$ の FNAL ではおよそ半分の $\pm 6^\circ$ になる (Fig. 4)。そのため、FNAL では J-PARC より小さい開口角を持つ光学系で集光できる。測定光学系は J-PARC と同じ同心球面で構成されるオフナー光学系[8]を採用した[4]。Figure 5 に実機で採用した光学系を示す。文献[4, 5]の光学系に、水平方向と垂直方向の非対称性の改善を加えたものとなっている。

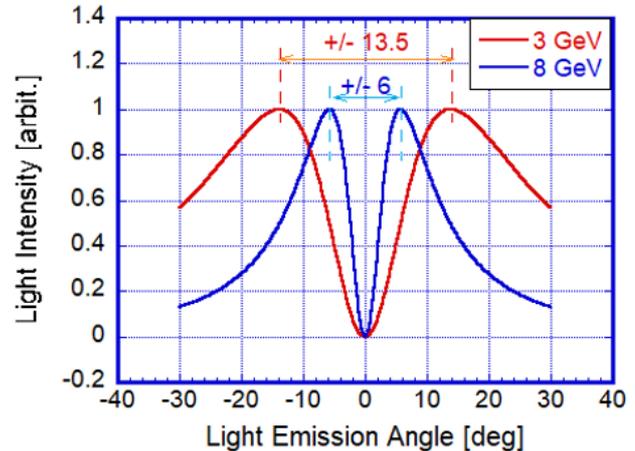


Figure 4: Light emission angle of OTR. red: J-PARC 3 GeV beam, blue: FNAL 8 GeV beam.

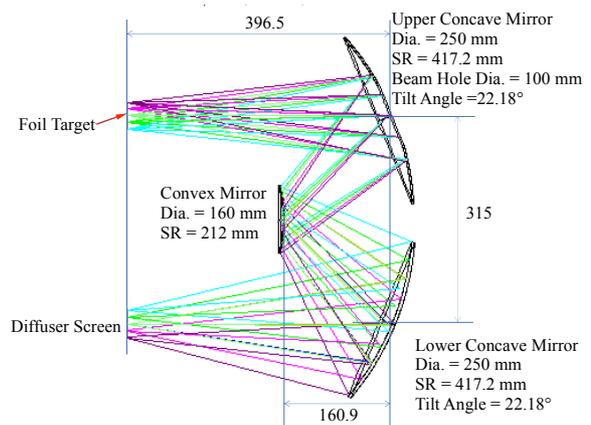


Figure 5: Offner optics for FNAL. SR stands for Surface Radius.

2.4 2次光学系

2次光学系 (Fig. 6) では、ディフューザスクリーン (140×140×T2 mm の合成石英ガラスの受光面を粒度 F300 の研磨剤で砂ズリ研磨) が角度分布のある OTR 光のビームイメージを散乱光に変換し、レンズで I.I. の光電面に結像する。この時、スクリーンからレンズまでの距離 (WD) が短いほど立体角 (SA) が大きく、光の収量を大きくとれる。そのためにもまず、スクリーンは大気中に置く。途

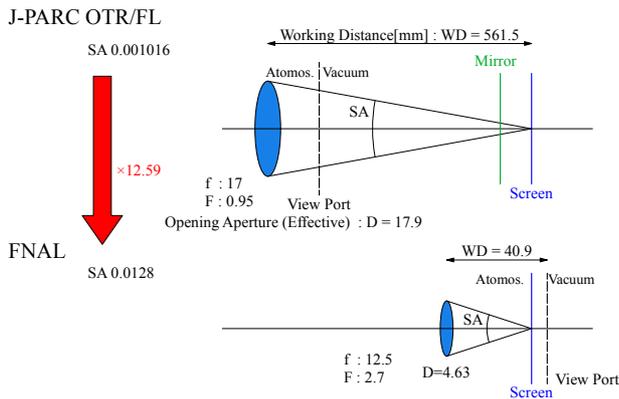


Figure 6: Improvement of secondary optics.

中のフランジや合成石英窓(厚み 30 mm)の厚みを WD 内に置かないためである。また、広角のマクロレンズ[9]を使うことで SA を大きく取ることができる。この方法は、現在開発中の J-PARC の MR 入射ビーム用 OTR/FL モニター[6, 7]で採用したものである。J-PARC では3-50 BT用

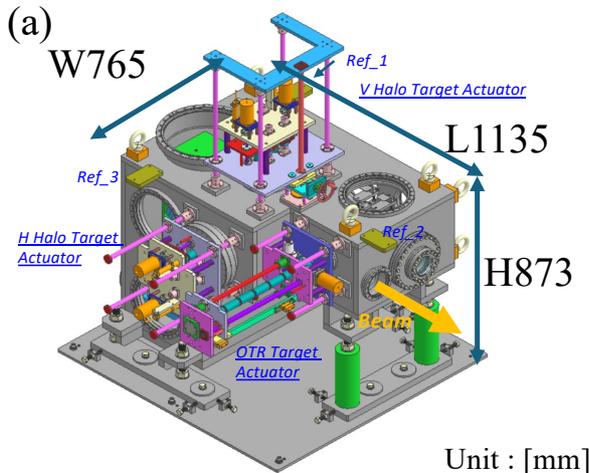
OTR/FL モニターで真空チャンバー内にスクリーンを置いているが、MR 用ではさらに集光量を上げるための方法であった。この方法により、FNAL 用では J-PARC の 3-50 BT 用に対して SA は 12.59 倍になる。よって Fig. 3 で示した FNALビームの密度分布のピークは 0.08 から 1.01 相当になり[4]、J-PARC と同じ測定感度であれば 6 桁程度のダイナミックレンジでビームバンチのハローの形状を測定できる見込みとなった。

2.5. 真空チャンバー

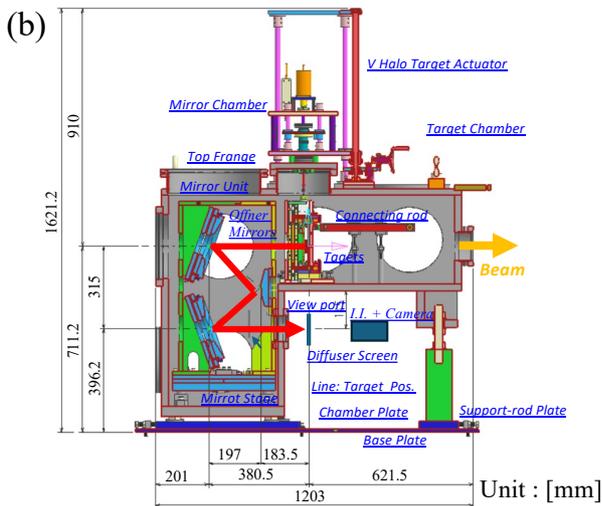
Figure 7 は FNAL 用ハローモニターの全体図である。L1135×W765×H873 mm の真空チャンバーの中にターゲットシステム(Fig. 8)とミラーユニットに収めたオフナー光学系が格納される。ターゲットから放射される OTR と蛍光はオフナー光学系により(Fig. 7(b)赤矢印)、ビューポート(合成石英窓)を通して 2 次光学系に導かれる。

2.6 ターゲットシステム

OTR と蛍光のためのターゲットシステム(Fig. 8)は、スライドガイド上をターゲットが移動する構造になっている。摺動部はリン青銅カムフォロワによって転がり動作する。



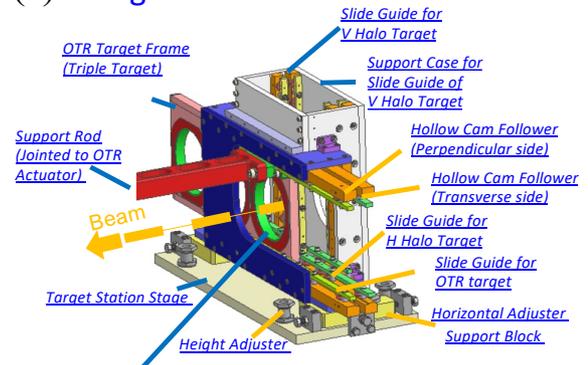
Unit : [mm]



Unit : [mm]

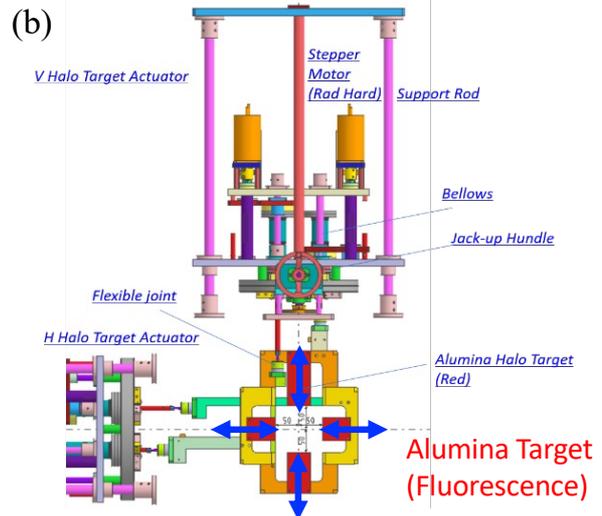
Figure 7: Overall view of the FNAL monitor device. (a) Exterior view, (b) Cross sectional view.

(a) Target Station



Titanium Foil Target (OTR)

* Foil is not set in this figure



Alumina Target (Fluorescence)

Figure 8: Target system for FNAL halo monitor. (a) Target Station and Target for OTR, (b) Target for fluorescence.

OTR のターゲットは厚み $5\ \mu\text{m}$ のチタンフォイルであり、3 連の OTR Target Frame の $100\ \text{mm}$ 径のリングに取り付けられる。OTR Target Frame の他のリングには、一つは $\text{H}20\times\text{V}10\ \text{mm}$ などの矩形穴をあけた $5\ \mu\text{m}$ のチタンフォイルがセットされる。この矩形穴でビームコアは通過し、矩形穴外部のチタンフォイルで 10^2 程度のビームコアのテールを検出する。同じ位置にセットしたアルミナからの蛍光と比較することで OTR と蛍光の光量比を求めることができる。最後のリングは、その他のターゲットマテリアルの試験に用いる。

蛍光は、Fig. 8(b)の水平ハロー(H)用アルミナターゲットペアと、垂直(V)用のペアから放射される。これらのターゲットは、Fig.8 (a)のそれぞれの Halo Target Slide Guide により直線動作する。これら計 4 枚のアルミナターゲットは、それぞれの直線導入機により独立に位置決めされる。

OTR と蛍光のターゲットのビーム進行方向の配置を Fig. 9 に示す。大口径オフナー光学系は、極めて深度が浅く $6\ \text{mm}$ 程度である。その深度に収まるようにターゲットを配置した。アルミナターゲット背面の $\text{T}0.5\ \text{mm}$ のステンレス板は、背面から放射される蛍光のマスクの役目をもち、OTR ターゲットは蛍光の影響を受けない。

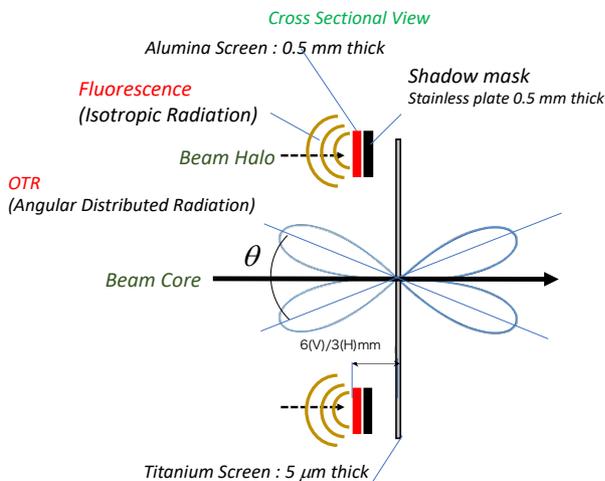


Figure 9: Cross-sectional view of targets.

2.7 ターゲット中心を決める基準座

チェンバー内のターゲット中心位置座標をチェンバー外部の 3 か所の基準座の測量座標から求めることができるようにした。基準座にはコーナーキュービックレフレクタ (CCR) を載せ、レーザートラッカー (LT) で測量する。

測量の方法は次のようにした。測量時のチェンバーと LT の位置関係を Fig. 10 に示す。1 か所の LT のみでは全ての基準座を測量できないため、2 台の LT を使用し、測量後に 2 つの LT 座標系を統合する方法を取った。LT_A では、チェンバー内部の TS の 3 つの基準座 (Ref_TS_L, Ref_TS_R_U, Ref_TS_R_L) と外部の 3 つの基準座 (Ref_1, Ref_2, Ref_3) の測量を行った。このとき TS の基準座はチェンバー側面のサービスポートを通して測量した。ポートの地上高が $711.2\ \text{mm}$ と低いため LT_A との距離を約 $9\ \text{m}$ に取る必要があった。また、上流側のビームポートフランジの外周を測量してフランジ中心位置を算出した。LT_B では、チェンバー外部の 3 つの基

準座を測量した。また下流側のビームポートフランジの測量からポート中心位置を算出した。

外部の 3 つの基準座は LT_A、LT_B で測量される共通の測量点であり、その座標から LT 2 台の座標系を統合した。統合座標系は、上流フランジの中心を原点とし、上流フランジ中心と下流フランジ中心を結ぶ仮想ビーム軸を Z 軸、その鉛直方向を Y 軸とした。

統合座標において全ての基準座の座標と仮想ビーム軸が決定できたことにより、外部の 3 つの基準座を FNAL 加速器内で測量し、それらの座標からターゲット中心座標を決定できる。また、本測定の実験性は 3 回測定して各座標のずれは $\pm 0.045\ \text{mm}$ 以下であった。これは LT の測定精度である $\pm 0.05\ \text{mm}$ と同じ程度であった。

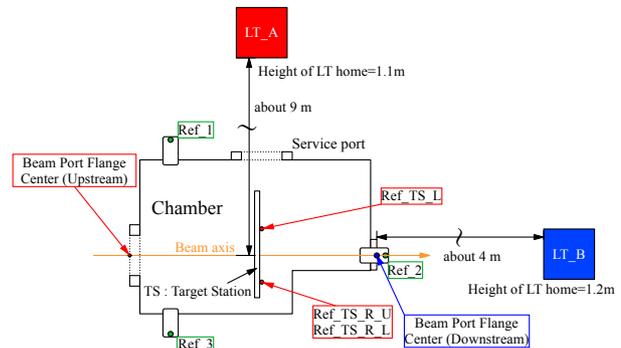


Figure 10 Position of laser tracker and reference points at surveying.

3. オフナー光学系の調整と特性試験

3.1 光学系の調整機構

光学系の調整は J-PARC 内のテストベンチで行なった。光学系の鏡面は同心球面であり、超精密旋盤で製作したアルミ (A5052) 製の凹面鏡 2 枚 (直径 $250\ \text{mm}$ 、SR 設計値 $417.2\ \text{mm}$)、凸面鏡 1 枚 (直径 $160\ \text{mm}$ 、SR 設計値 $212\ \text{mm}$) からなる。波面精度はいずれも $\lambda/4$ 以下である。それらはアルミのフレームで保持される (Fig. 7)。これらをまとめてミラーユニットと称する。上部の凹面鏡には、ビ

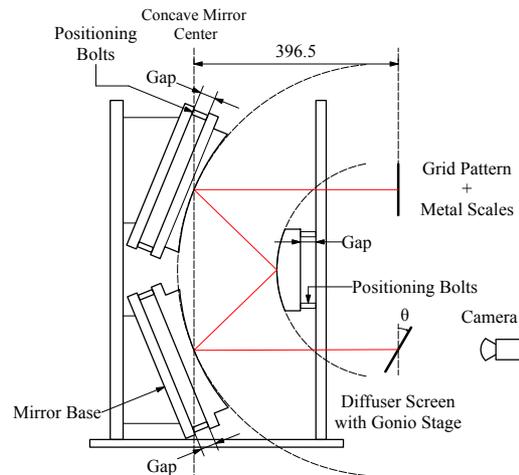


Figure 11: Positioning of convex mirror.

ームが通り抜けるための直径 100 mm の穴を設けた。

Figure 11 に示すように、凹面鏡、凸面鏡ともにミラーベース板に取り付けられ、ミラーベース板は、ユニットフレームの支持板との間に 5 mm (設計値) のギャップを置いて支持板に取り付けられている。ギャップは、ミラーの位置調整用に設けられており、ミラーベース板の 4 隅に付けた位置調整用の押し引きボルトで調整する。

光学系の調整は、まず凸面鏡を外した状態で凹面鏡の対称性を確認した。次に、凸面鏡を取り付け、最も解像が良くなるように凸面鏡の位置を調整した。最後に、凹面鏡の傾斜角を調整した。

3.2 凹面鏡の対称性

凹面鏡の調整では Fig. 12(a)のようにレーザー墨出し器を使用した。上下の凹面鏡に対し、同心球面近傍に置いたレーザー墨出し器からの鉛直レーザーラインを照射し、2 枚の凹面鏡でフォーカスされるスポットを OHP フィルムに結像させ、その焦点位置を測定した。上下の凹面鏡の位置調整用ギャップを設計値である 5 mm にセットしたところ、上下の凹面鏡のスポットは 1 点に重なった (Fig. 12(b))。この焦点の高さをハイトゲージで測定すると

350.26 mm (設計値 350 mm) だった。この時の焦点と凹面鏡中心の距離から凹面鏡の SR を求めると 416.69 mm (設計値 417.2 mm) だった。これは凹面鏡製造時の 3 次元測定器による測定値 417.27 mm にもほぼ一致した。

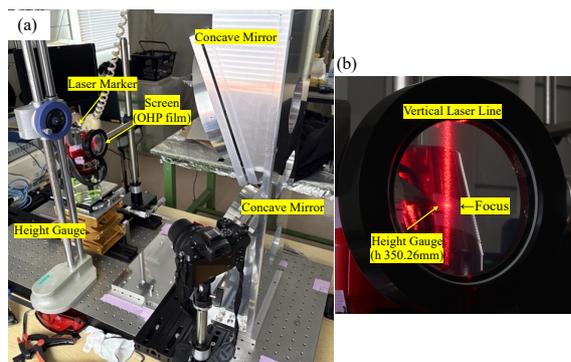


Figure 12: Symmetry check of concave mirrors. (a) Setup, (b) Vertical laser line and focus spot by concave mirrors.

3.3 凸面鏡の調整と結像性能

凹面鏡の対称性を確認したので、凸面鏡の位置調整を行った (Fig. 11)。凸面鏡を位置調整用ギャップが 5 mm の位置にセットし、ターゲットに 10 mm 格子のグリッドパターンと 1 mm ピッチの金属スケールを水平と垂直にセットした。出射光軸上にはディフューザスクリーンを、鉛直軸との角度を調整できるゴニオステージに載せて取り付け、その下流にスクリーンの結像を測定するカメラをセットした。凸面鏡の位置を変えて結像を調べた。

現時点で最善の調整結果を Fig. 13 に示す。この時の条件はギャップ 0 mm (設計値 5 mm)、ゴニオステージの角度 2° である。グリッドパターンターゲットの中心位置を矢印で示した。また、図の直径 50 mm の円は、FNAL 8 GeV ビームを測定するために必要な視野 (Fig. 3) である。円内に注目すると、中心部はスケールの

0.1 mm の目盛り線まで解像した。一方、上部は横線が縦方向に 2 本に割れるなどの収差が見られた。オフナー光学系は鉛直方向と水平方向が非対称であるためにこのような収差が残る。この改善には波面の補正などの方法が必要と考えられる。また、凸面鏡の位置を設計値から 5 mm ずらしたが、設計値のままでもほぼ同様な結像であった。5 mm ずらしてスクリーンを 2° 傾斜させることで少し解像が向上した程度であった。

最後に、凹面鏡の傾斜角 (設計値 22.18°, Fig. 4) を調整したが、設計値が最もよい結像であった。

以上から、光学系は、幾何光学的には設計通りの結像性能であることを確認できた。

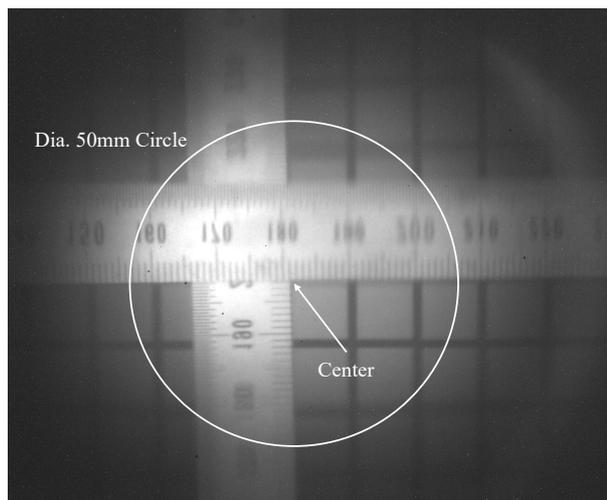


Figure 13: Result of convex mirror positioning (Best of the present).

4. まとめ

J-PARC で実績のある 6 桁のダイナミックレンジをもつ OTR/FL モニターをベースに、FNAL の 8 GeV ビーム用のハローモニターを開発している。装置は KEK が設計し、日本で製作した。バンチあたりのビーム強度は、FNAL のビームが J-PARC より低強度であることを念頭に設計し、バンチあたり 5×10^{10} 陽子のようなバンチ強度においても 6 桁のハローが測定できる仕様とした。現在は光学系の性能試験を J-PARC のテストベンチで進めている。その結像は中心部で 0.1 mm を解像しており、FNAL の $\sigma 2.5$ mm などの小さなビームコアの測定に十分対応できる性能であった。今後、光学系の試験では、光学系の焦点深度 6 mm の範囲内での結像特性を調べる。その後、今年度中に FNAL へ輸出し、翌 2026 年度夏に加速器トンネルにインストールする予定である。

尚、本研究開発は日米科学技術協力の "Proton Beam Dynamics for Facilities with High-Power Neutrino Beams" の課題として実施している。

参考文献

- [1] "The PIP-II Reference Design Report", Fermilab, Batavia, IL, USA, Rep. FERMILAB-DESIGN-2015-01, Jun. 2015. doi:10.2172/1365571.

- [2] Y. Hashimoto *et al.*, “A Development of High Sensitive Beam Profile Monitor using Multi-Screen”, in *Proc. IBIC'13*, Oxford, UK, Sep. 2013, paper TUCL2, pp. 338-341, <https://epaper.kek.jp/IBIC2013/papers/tucl2.pdf>
- [3] Y. Hashimoto *et al.*, “Two-Dimensional and Wide Dynamic Range Profile Monitor Using OTR / Fluorescence Screens for Diagnosing Beam Halo of Intense Proton Beams”, in Proc. HB'14, East Lansing, MI, USA, Nov. 2014, paper TUO2AB04, pp. 187-191, <https://accelconf.web.cern.ch/HB2014/papers/tuo2ab04.pdf>
- [4] Y. Hashimoto *et al.*, “A Wide Dynamic-Range Halo Monitor for 8 GeV Proton Beams at FNAL” in Proc. NaPAC2022, NM, USA, Aug. 2022, paper MOPA14, pp. 75-78, <https://www.jacow.org/proceedings/napac2022/papers/mopa14.pdf>
- [5] Y. Hashimoto *et al.*, “A Development of Wide Dynamic-Range Halo Monitor for 8 GeV Proton Beams at FNAL” in Proc. IBIC2024, Beijing, China, Sep. 2024, paper WEP12, pp. 274-278, <https://accelconf.web.cern.ch/ibic2024/pdf/WEP12.pdf>
- [6] Y. Sato *et al.*, “Installation Plan of New 2D-Beam-Profile-Monitor by OTR AND Fluorescence at the J-PARC Main Ring”, in Proc. 16th PASJ, Kyoto, Jul. 2019, pp.1125-1129, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI038.pdf
- [7] T. Sasaki *et al.*, “J-PARC Main Ring の入射ビームのための OTR と蛍光を用いたワイドダイナミックレンジプロファイルモニターの開発” in Proc. 21st PASJ, Yamagata, Jul. 31-Aug. 3, 2024, pp.875-880, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/FRP0/FRP014.pdf
- [8] A. Offner, “New concepts in projection mask alignment”, *Optical Engineering*, Vol. 14, No.2, 1975, p.130-132.
- [9] <https://vst.co.jp/en/machine-vision-lenses-en/vs-1ld-series/>