

MITIGATION OF COHERENT-OTR LIGHT EFFECT FOR THE BEAM PROFILE MONITOR OF SACLA

Shinichi Matsubara ^{#A)}, Hirokazu Maesaka ^{B)}, Shinobu Inoue ^{C)}, and Yuji Otake ^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo-ken, 679-5148

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd.

1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo, 679-5165

Abstract

A screen monitor (SCM) system for SACLA has been developed and was installed in order to obtain a direct image of a transverse beam profile. The taken image has a spatial resolution of about 10 μm , which is required to investigate electron-beam properties, such as a beam emittance. The SCM takes an image of the beam profile by a CCD camera with a customized optical system through an OTR radiation from a stainless steel screen. At the beginning of SACLA operation, strong coherent OTR (COTR), which made an incorrect beam profile, was observed. In COTR light, light intensity and an imaging with a speckle widely fluctuate in every shot. In order to suppress the COTR on the SCM, the stainless steel target was replaced to a Ce:YAG scintillation target. Since the COTR was still generated from the Ce:YAG target, a spatial mask was employed. The mask was mounted on the center of an optical axis of the SCM, because the COTR light is emitted forward within $\sim 1/\gamma$ radian from the screen to the CCD, while scintillation light does not have angular dependence. Hence the mask obstructs the COTR light to the CCD. Clear beam profiles with a diameter of a few tens of micro-meter are observed by means of the SCMs with this simple improvement. This fact indirectly testifies the SCM has a spatial resolution of about 10 μm .

SACLA のビームプロファイルモニターにおける Coherent-OTR 光除去への取り組み

1. はじめに

SPring-8 サイトにおいて、X 線自由電子レーザー (XFEL) である SACLA^[1,2]が建設されて、2012 年 3 月から利用供用が開始されている。この SACLA において、波長 0.1 nm 以下の高輝度な X 線レーザーを生成させるためには、3 kA 以上の高いピーク電流で $1 \pi \mu\text{m rad}$ 程度の低エミッタンスである電子ビームをアンジュレータ区間に伝送する必要がある。熱電子銃から出射された低エミッタンスの電子ビームを、ビームチョッパーによって 1 ns を切り出し、入射部における速度変調バンチングと 3 段のシケイン・バンチコンプレッサーによりエミッタンスの悪化を抑えながら数 10 fs まで圧縮する。

本 SACLA においては、3 段目のバンチコンプレッサー後にビームプロファイル測定を行うスクリーンモニター (SCM)^[3,4]を設け、ビームエミッタンス測定と、電子バンチ長測定を行う。バンチ長測定には、SCM と RF-deflector^[5]を組み合わせることで電子ビームの時間プロファイルを空間プロファイルとし

て測定する。これらのモニターにより、目標仕様の電子ビームへ調整を行う。そのためには本 SCM には、10 μm の測定分解能が求められる。SACLA のバンチコンプレッサー後で、ビームプロファイルをモニターする SCM は、X 線レーザー生成のための電子ビーム調整を行うためには必要不可欠なモニター装置である。

ところが SACLA の運転開始後、バンチコンプレッサー後の SCM において、SCM のターゲットスクリーン上で、coherent OTR (COTR) が発生してビームプロファイルが測定できない問題が現れた^[6]。この問題は、LCLS などの他の FEL 施設においても確認がされている。しかしながら、SACLA の実証機である SCSS 試験加速器において、この COTR の問題が確認されなかったため、SCM の開発・製造当初には COTR 光への対策が考慮されていなかった。

そこで、SACLA へ設置された SCM に改良を加え、COTR 光の問題について対策を行った。本稿において、この対策について記述する。

2. SACLA の SCM と COTR 光の発生

SACLA において、本 SCM はビーム伝送の調整、ビーム形状の調整、ビームパラメータの測定 (エ

[#] matsubara@spring8.or.jp

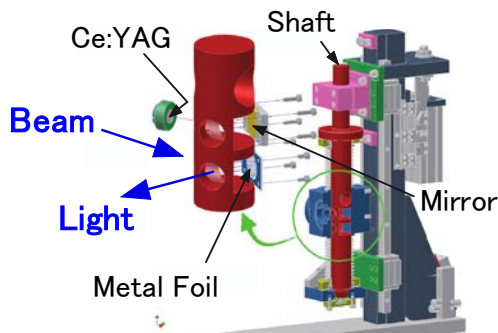


図 1 : SCM のターゲット部の構成

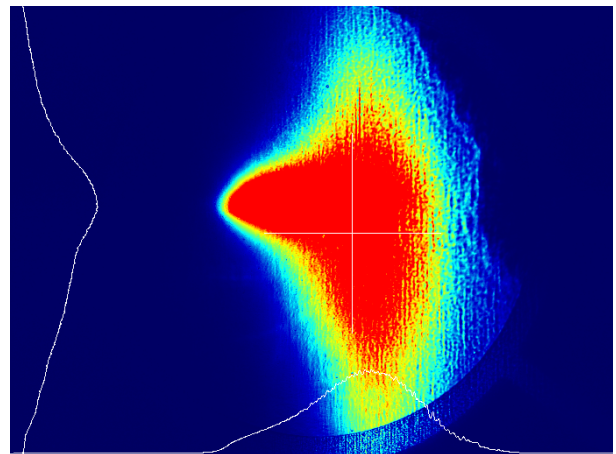


図 3 : COTR 光による SCM 像

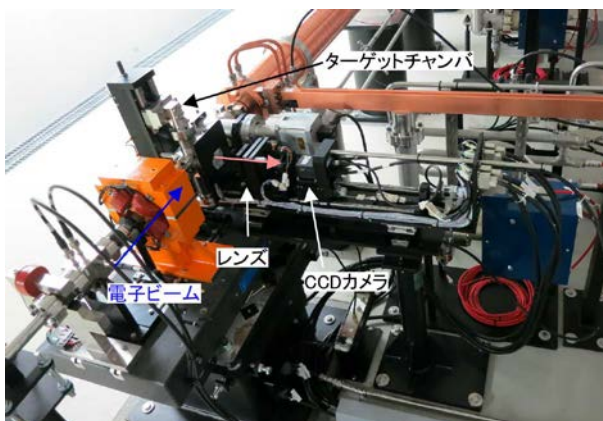


図 2 : SCM の全体構成

ミッタンス、Twiss パラメータ等) などに利用される。そのため、加速器に沿って、46 台の SCM が設置され、各所にて使用されている。

本 SCM の構成を図 1、2 に示す。SCM は、可動式のターゲットとレンズ光学と CCD カメラにより構成される。光学系は、収差を抑え 10 μm 以下の分解能が得られるように特別に設計されている。SCM の発光体ターゲットとして、蛍光体の Ce:YAG と OTR 発生用の金属フォイルを用意した。Ce:YAG はビームエネルギー 300 MeV 以下、OTR フォイルは 30 MeV 以上で使用できるように用意をした。Ce:YAG 蛍光体は、電子ビームが結晶を通過する際に発光をするため、発光源が結晶厚みの深度を持つ。この結晶厚みによるピンボケ効果によりビームプロファイルの分解能が低下する。極力この効果による分解能の低下を防ぐため、結晶厚みを 0.1 mm と薄くしている。また、ビームエネルギーの高いところでは、分解能を良くしやすい OTR フォイルを用いるように考えた。OTR は、電子が異なる物質へ遷移する境界点で発生する輻射である。どちらのターゲットにおいても、ビーム軸に対して 90 度の方向にターゲットからの発光を取り出し、光学系を通して撮像をする。OTR フォイルは 45 度に傾け設置し光を取り出す。また、Ce:YAG はビーム軸に対して垂直に設置し 45 度に傾けたミラーにより光を取り

出す。光学系と CCD カメラの位置関係は設置箇所により変えている。これは、測定対象のビームサイズにより、光学系の倍率を変えて、測定を行うためである。

ところが、SACLA の運転が開始されると 3 段目のバンチコンプレッサーより下流では、SCM のターゲット上で COTR 光が発生して、この SCM ではビームプロファイルが測定できない問題が現れた。COTR 光は発光強度が通常の OTR 光と比べて強度が桁違いに大きいうえ、ショット毎に大きく変化するため、撮像光量の調整が困難である。また、撮像できる光量のショットであったとしても、コヒーレント光である COTR 光を結像したものはスペックルが現れ、正確なビームプロファイルがモニターできない。COTR 光を本 SCM で撮像した例を図 3 に示す。バンチコンプレッサー後のビームエネルギーは 1.4 GeV であり、SCM のターゲットには OTR フォイルを用いている。

以上の COTR 光の問題を、既設の本 SCM において解決するために、対処を行った。

3. マスクを用いた COTR 光の抑制

本 SCM 上での COTR 光の抑制を行うため、ターゲットから発光する COTR 光とビームプロファイル情報を持つ光とを分離することを検討した。COTR 光と OTR 光では光の分離が困難なため、SCM のターゲットとして Ce:YAG を用いることにした。元々、COTR が現れるバンチコンプレッサー後では、OTR フォイルを使用していたが、Ce:YAG に変更をした。ターゲットとして Ce:YAG を用いても、Ce:YAG の表面において COTR 光が発生していた。また後日、明らかになったが、Ce:YAG 後方に設置されている 45 度の取り出しミラーの表面においても、COTR 光が発生していた。そこで、COTR 光と Ce:YAG による蛍光とを分離する。

Ce:YAG の蛍光は、結晶より四方に発光し指向性を持たない。一方、OTR、COTR は $\sim 1/\gamma$ rad の円錐強度角度分布を持つ。 γ はローレンツ因子であ

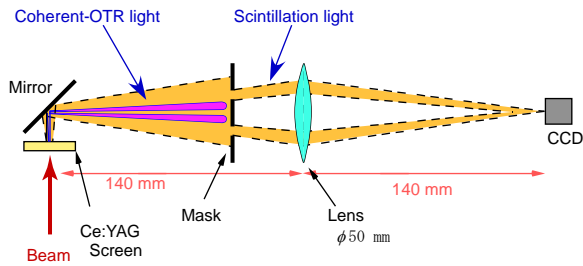


図4：空間遮光マスクを用いた SCM の構成図

る。また、Ce:YAG の蛍光寿命が約 60 ns に対して、OTR 光の発光時間は電子パンチ長に等しい。蛍光と COTR 光は、空間、時間それぞれの領域で分離することが可能である。

他の施設では、高速ゲート CCD カメラを用いて時間領域で分離することを行なっている^[6]。しかしながら、一般の CCD カメラでは数 10 ns の精度でトリガー動作させることは不可能である。本施設において、パンチコンプレッサー下流の 30 台にも及ぶ既設の SCM システムの CCD カメラ全てを高速ゲート CCD カメラへ変更することは、その価格から考えて困難である。そこで SACLA では、空間領域による蛍光と COTR 光の分離を行うことにした。

具体的には、空間遮光マスクを設置し、COTR 光を除去した。空間マスクを、ターゲット真空チャンバーとレンズの間に設置した。拡がり角が $1/\gamma$ rad と小さい COTR 光を空間遮光マスクにより除去し、拡がり角が大きい蛍光はこの空間遮光マスクの外側を通り結像するようにした。遮光マスクを設置した際の SCM 構成図を図 4 に示す。遮光マスクの設置により COTR 光を除去して、プロファイルイメージを測定することができた。

しかしながら、ビームエミッタンスの測定のために電子ビームを小さくフォーカスしたところ、プロ

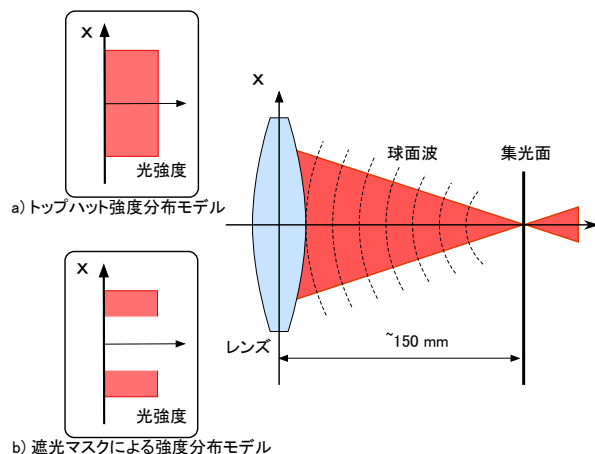
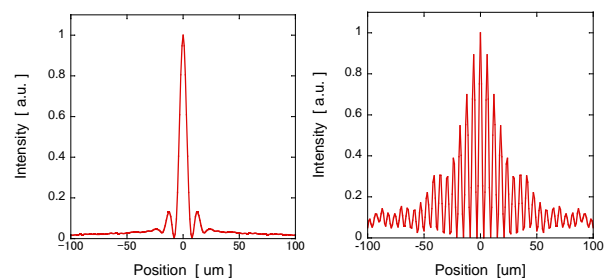


図5：球面波の集光プロファイルの計算モデル



a) トップハット強度分布モデル b) 遮光マスクの強度分布モデル

図6：理想光源の計算結像プロファイル

ファイル像に COTR 光が現れた。これは、光の回折広がりにより、遮光マスクの範囲を COTR 光が超えたためである。回折角は $\sim \lambda/d$ により見積もることができる。λは光の波長、d は発光源のサイズである。ビームをターゲット上で 10 μm に絞った際に、COTR 光の拡がり角は、約 100 mrad となる。ビームを小さく絞った際には、COTR 光の回折広がりが大きくなる。遮光マスクは、この回折広がりを考慮して設置している。また、可能な限り光学系の採光角度を大きくしながら、測定分解能を高くするために、光学系の倍率は 1 倍としている。

また、チャンバー内での乱反射から来る迷光が、光学系によって結像される問題も分かった。そこで、遮光マスクには、蛍光の画角の外側の光も遮光できるようにし、チャンバー内の迷光も除去した。

Fraunhofer 回折の式により、理想的な光源による結像プロファイルを計算する。サイズ 40 mm のトップハット強度分布を持つ理想的な球面波が、150 mm 離れた場所で結像をするモデルで行った。計算モデルを図 5 に示す。トップハット強度分布のモデルは、集光サイズが、FWHM で 7.8 μm になる (図 6 a)。遮光マスクを用いたモデルでは、最小集光サイズは 37 μm (FWHM) になる (図 6 b)。遮光マスクにより、SCM の分解能が低下するが、それでも十分小さいビームサイズまで測定できる。また、光軸中心に設置した遮光マスクにより、6 μm の間隔で回折パターンが現れているが、SCM に使用している CCD カメラの Pixel サイズが 6.5 μm であるため、SCM の撮像イメージには現れない。

実際に、電子ビームを小さく絞った際のプロファイル像を図 7 に示す。また、図 8 にその際の縦軸のプロファイルを示す。ビームが 30 μm (rms) に絞られていることが測定できた。ビームサイズの変化もモニターできており、仕様目標である 10 μm 程度の分解能が実際に得られている。

3. まとめ

SACLA の運転が開始され、プロファイルモニターにおいて COTR 光が発生する問題が現れた。そこで、ターゲットに Ce:YAG 蛍光体を用いることに

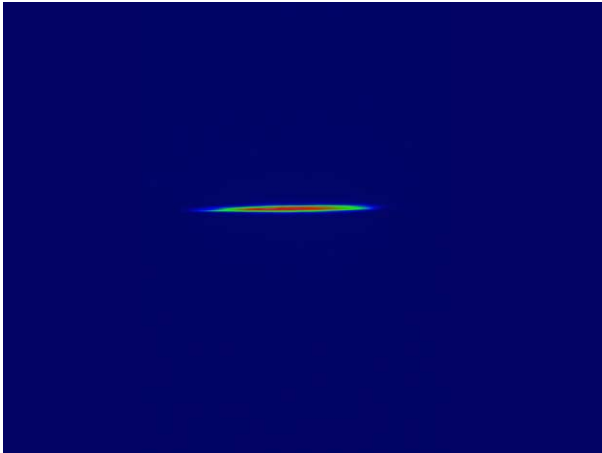


図7：遮光マスクを用いてCOTR光を除いたプロファイルイメージ。イメージサイズ 6.7 x 8.9 mm

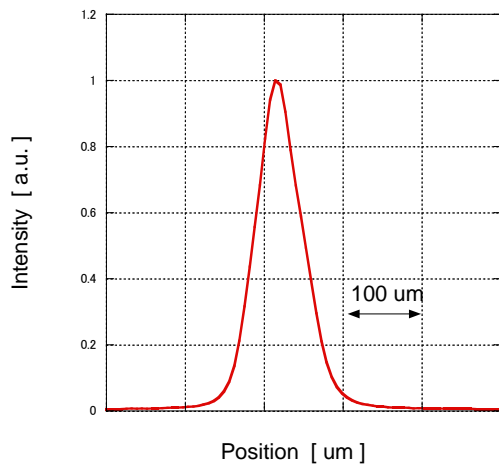


図8：COTR光を除いたビームプロファイル。
プロファイルサイズ：30 μm (rms), 65 μm (FWHM)

よって、COTR光と蛍光との拡がり角の違いによる分離を行った。SCMの光学系に空間遮光マスクを設置することにより、COTR光を除去した。これにより、10 μm (rms) 程度の分解能でプロファイル測定ができ、ビームの規格化エミッタンス $1 \pi \mu\text{m rad}$ が測定できている。また、RF-deflectorと組み合わせることにより10 fsの分解能でバンチ長を測定できるようになった。既存のSCMに軽微な改修により、COTR光の問題を解決し、SACLAの調整で重要なモニター装置として、使用がされている。

参考文献

- [1] T. Ishikawa, *et al.*, Nature Photonics advance online publication, 24 June 2012 (doi:10.1038/nphoton2012.141).
- [2] H. Tanaka, "Operation Status and Performance Upgrade Plan of SACLA", in these proceedings.

- [3] K. Yanagida, *et al.*, "Development of screen monitor with a spatial resolution of ten micro-meters for XFEL/SPring-8", Proceedings of LINAC'08 (2008).
- [4] K. Yanagida, *et al.*, "Spatial resolution of screen monitor for XFEL/SPring-8", Proceedings of LINAC'08 (2008).
- [5] H. Ego, *et al.*, "Design of the Transverse C-band Deflecting Structure for Measurement of Bunch Length in X-FEL", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, (2009).
- [6] Christopher Behrens, *et al.*, "Electron beam profile imaging in the presence of coherent optical radiation effects", PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS, 062801 (2012).