Experimental study of OTR on uneven metallic surface

Shusuke Nisiyama^{*A)}, Satoshi Tomioka^{A)}, Takeaki Enoto^{A)}, Tsumoru Shintake^{B)},

A) Graduate School of Engineering, Hokkaido University
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-8628, Japan
B) RIKEN Harima Institute

SPring-8, Kouto, Mikazuki-cho, Saygun, Hyogo, 679-5148, Japan

Abstract

Optical transition radiation (OTR) is now extensively used for beam monitoring of high energy accelerators. Because of very sharp angular distribution of OTR for high γ particle beam, tight alignment for the OTR monitor mechanics and optics is required. To reduce the angular distribution of OTR, we have investigated OTR of an uneven metallic surface and compared with one of an ordinary smooth surface.

粗い金属表面における OTR の発光特性

1. はじめに

遷移放射光 (OTR: Optical Transision Radiation) は、 高エネルギーの荷電粒子が誘電率の異なる媒質中へ 移動する際に媒質の境界面から放射される広いスペ クトルをもつ電磁放射で、加速器のビームプロファ イルモニタの発光機構としてもしばしば利用されて いる。OTR スクリーンとして金属などの良導体を用 いる場合は、入射荷電粒子によって入射点を中心に 局所的に誘起された表面電流が電磁放射を作り出し ていると考えることができる。そのため空間分解能 に優れ、また、スクリーンには薄膜や箔を用いるこ とでビームの損失やスクリーンの損傷、放射化など を低減できる。一方、導体上に入射荷電粒子によって 誘起された表面電荷は、荷電粒子の通過後は急速に 散逸するため、OTR はピコ秒オーダーの時間分解能 を持ち、ストリークカメラや高速ゲートカメラでマ イクロパルス単位の時間スケールでの高時間分解能 の計測が可能である^[1]。

しかしながら、相対論的な荷電粒子の OTR は非常 に鋭い指向性がある。ビームモニタに利用しやすい 後方放射(荷電粒子が真空中から媒質中へ入射する場 合の OTR)は、荷電粒子が媒質表面に対して光学的 に反射する方向に対する角を θ とすると、OTR の放 射強度 I は

$$I \propto \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2}$$

となり^[2]、ローレンツ係数を γ とすると $\theta = 1/\gamma$ 離れた方向に鋭い放射のピークを持つ。そのため、OTR を利用したモニタの光学系は高精度のアラインメントが要求される。

適度な粗さを持つ面は、微視的には表面がランダムな方向を向くために光学的に拡散反射面となり、反射光は広範囲に拡散される。個々の荷電粒子によるOTRの発生も局所的な現象であるので、粗い金属表

面による OTR は個々の荷電粒子に対する表面が様々 な方向を向くことから、OTR の鋭い指向性が緩和さ れることが期待できるが、発光強度の低下と表面の 粗さによる空間分解能の低下も見込まれる。粗い表 面における OTR の数値シミュレーションによる検討 ^[3] では、観測する波長と同程度の凹凸で発光角度分 布が広がることが示されている。

本報告では、凹凸の分布が規定されている粗さ試験 片を用いて、粗い金属表面における OTR 発光角度分 布を電子 LINAC で実験的に測定した結果について、 鏡面状の金属表面の OTR と比較検討する。

2. 実験体系

2.1 OTR スクリーン

OTR スクリーンには、表面粗さの比較試験に用いられる KTA-TATOR, INC.の Keane-Tator Surface Profile Comparator を用いた。これは厚さ 0.7mm のニッケル板にプラスト処理で凹凸面を作成したもので、プラスト材の種類と凹凸の深さで分類されている。今回は、サンドプラスト処理で、凹凸の深さが 0.5mil(12.7μm)の試験片 (0.5S70)を用いた。付属の特性図では、凹凸深さの平均が 0.74mil,中央値が 0.63mil,分布範囲が 0.32–1.73mil となっている。肉眼では十分細かい 艶消し面に見え、スペックルはわずかに確認できる程度だった。これよりも凹凸の深い (1S70, 2S70 など)試験片ではスペックルがはっきりと確認できた。また、比較対象に鏡面処理された厚さ 0.7mm のステンレス板を用いた。

2.2 測定体系

実験は北海道大学の 45MeV 電子ライナックで行った。体系図を図1に示す。OTR スクリーンは自動回転ステージに垂直に固定し、ビーム軌道上に設置した。また、OTR スクリーンをビーム軌道に対し垂直方向から見込む位置に記録用のデジタルビデオカメラ (SONY DCR-TRV900)を設置した。光学系の焦点

^{*} E-mail: shu@eng.hokudai.ac.jp



図 1: 実験体系図 (上面図)

距離は 51.6mm, F 値は 2.8 で、レンズの実効直径は 18.4mm である。OTR スクリーン上での解像度は横方 向が 0.10mm/pixel, 縦方向が 0.11mm/pixel となった。

加速器の運転条件は、エネルギー 45MeV、マクロ パルス幅 10ns、1 マクロパルス当たりの電荷量は約 6nC で実験をおこなった。

2.3 デジタルビデオカメラによる画像処理

今回の実験では画像の記録にデジタルビデオカメ ラを用いた。撮像素子がCCDであるため耐放射線性 は低いが、一時的な観測でデータをオフラインで処 理する場合には非常に便利であった。miniDVテープ には1時間の録画が可能で、IEEE-1394インターフェ イスでコンピュータへ転送し画像処理を行うことが できる。(ただし、1時間の画像は12GB程度になる) また、デジタルビデオの記録フォーマットは動画の フレーム毎に独立しているため、静止画を取り出し て画像解析することが容易である。しかし、動画の1 フレームのタイミングと加速器のトリガーを同期さ せられないため、OTR のような速い現象では観測で きない場合があった。

今回の実験では、記録した動画の輝度情報をグレ イスケールの静止画像に変換し、輝度の2次元分布 をデータとして使用した。カメラのリニアリティは 別に実験的に補正関数を求めておいて補正した。

3. 結果と考察

実験では 25pps で電子ビームを照射しながら OTR スクリーンがほぼビーム上流方向を向いてる状態か らカメラの方向へ、90 度を 64 秒間で右回りに回転 させた。OTR スクリーンが SUS 鏡面 (以下鏡面と呼 ぶ)の場合は、OTR が確認できたのは非常に狭い角



図 2: SUS 鏡面による OTR の像



図 3: 粗さ試験片 0.5S70 による OTR の像

度範囲であったが、粗さ試験片(以下粗面と呼ぶ)を 用いた場合には、OTRの強度は大きく低下したもの の、ほぼ全ての角度範囲でOTRが確認できた。

3.1 OTR 像の比較

スクリーンが鏡面の場合に OTR が確認できたのは、 スクリーンがビーム軌道およびカメラの方向に対し てほぼ 45 度の向きの場合のみであった。そのときの OTR の画像が図 2 である。また、スクリーンが粗面 でほぼ同様の角度における OTR の画像を図 3 に示 した。

鏡面の OTR 像は非常に明るいため、光学系に絞り (F=11) を入れて測定した。この状態ではレンズの実 効直径が 4.7mm、発光点から見たレンズの大きさは 平面角で 6mrad になる。電子ビームのエネルギーが 45MeV($\gamma = 88$) であり、OTR の指向性の目安である $1/\gamma = 11$ mrad よりも小さいので、OTR の一部しか 光学系に入っていない。そのため、発光域の大きさ はセラミック蛍光板で確認したビームの径よりも小 さくなっている。

粗面の OTR 像は発光域の径が鏡面の OTR 像よりも 大きく、ビームの径とほぼ同じであった。また、ビー ム中心付近の OTR 像の輝度は、鏡面と比較して約 1/350 であり、微弱なビームの計測には高感度のカメ ラが必要とされるであろう。発光域には所々に強く



図 4: SUS 鏡面による OTR の角度分布



図 5: 粗さ試験片 0.5S70 による OTR の角度分布

発光している点が見られるが、これは凹凸面の中で も比較的広い微小面からの OTR の寄与と思われる。 発光域全体にむらがあり、0.1mm の解像度ではこの 試験片 (凹凸の代表値が 12µm) よりも細かい粗さが 必要であるといえる。

3.2 OTR の角度分布の比較

図 4,5 は、横軸が OTR スクリーンの回転角 (ただし 原点は不定)を表し、図 2,3 で垂直位置が 10mm の位 置における 1 次元輝度分布を縦方向に配置した、輝 度の等高線図である。

図4は鏡面による通常のOTR であり、OTR が確認 できたのは約40mradの範囲であった。ピークとピー クの間隔は約22mrad で $2/\gamma$ に一致している。

それに対し、図5に示した粗面のOTRでは、回転 角が0mrad付近から1300mradまで、輝度が小さいな がらもほぼ全範囲にわたってOTRが確認できた。回 転角が0mrad付近では、OTRスクリーンはビームに 対しほぼ垂直に向いていてそのスクリーンをほぼ真 横から観測している状態であり、表面にほぼ平行な 方向へもOTRが出ていることがわかる。また、回転 角が1300mrad以上では、ビームは10度程度のかな り浅い角度で入射し、スクリーンにほぼ垂直方向で 観測している状態で、ビームが入射する面積が大き くなっているのでOTRの輝度はさらに低下している ものの OTR が確認できた。最も OTR が明るく確認 できたのは回転角が 800mrad 前後の場合であり、ス クリーンがビームに 45 度の方向から入射し、鏡面反 射の方向で観測している状態である。

鏡面の場合にはスクリーンの数 mrad 回転しただけ で OTR の輝度が大きく変化するが、粗面の場合には 数十 mrad 回転しても OTR はほとんど変化しない。 したがって、粗面の OTR ではスクリーンや光学系の 設置精度を緩めることが可能で、さらに、ビームの 位置や方向が大きく変わる場合でも使用可能である と考えられる。

4. まとめ

粗さ試験片を用いて粗面による OTR の指向性を調 べ、光学的な拡散反射面と同じように広い範囲にわ たって放射されることが確かめられた。粗面の OTR では輝度が大きく低下するが、測定困難なほど低下 することはなかった。用いた粗さ試験片は凹凸の代表 値が 12µm と十分に細かいものであったが、OTR の 発光には表面の凹凸がむらになって現れており、ビー ムの電荷密度分布計測などに用いるためには更に細 かい凹凸の粗面が必要である。

参考文献

- A. H. Lumpkin, M. D. Wilke, "Time-resolved electronbeam characterizations with optical transition radiation", Nucl. Instr. and Meth. A331, 803-808, 1993
- [2] L. Wartski, et al., "Interference phenomenon in optical trasition radiation and its application oto particcle beam diagnostics and multiple-scattering measurements", J. Appl. Phys., 46, 3644–3653, 1975
- [3] S Reiche, J. B. Rosenweig, "Transistion Radiation for Uneven, Limited Surface", Proceedings of the PAC2001, 1282-1284, 2001