

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 Transition 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られることができる。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 のニッケル板にブラスト処理で凹凸面を作成したもので、ブラスト材の種類と凹凸の深さで分類されている。今回は、サンドブラスト処理で、凹凸の深さが 0.5mil (12.7 μ m) 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ck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ck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

experimental setup
(top view)

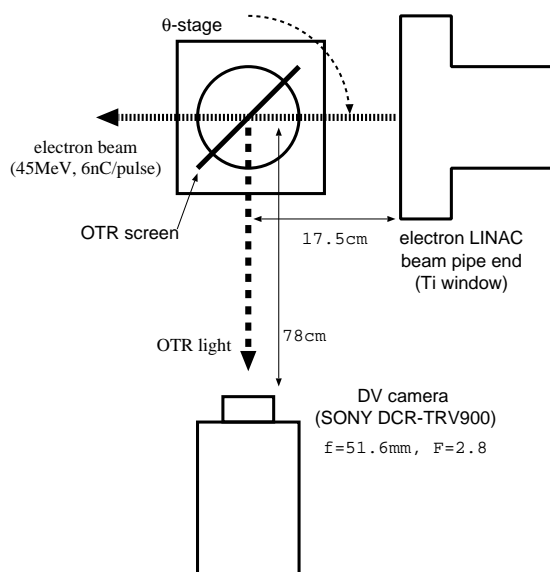


図 1: 実験体系図 (上面図)

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い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

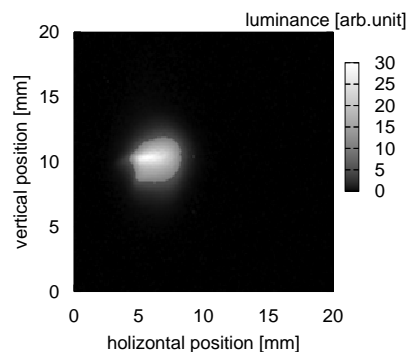


図 2: SUS 鏡面による OTR の像

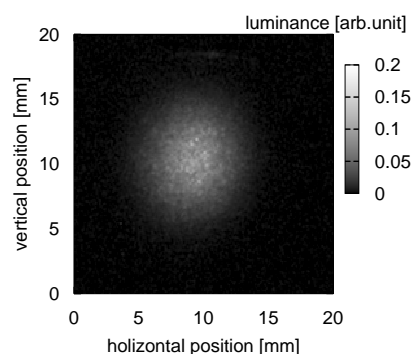


図 3: 粗さ試験片 0.5S70 による OTR の像

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は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 像は非常に明るいいため、光学系に絞りを (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 $1/\gamma = 11\text{mrad}$ 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

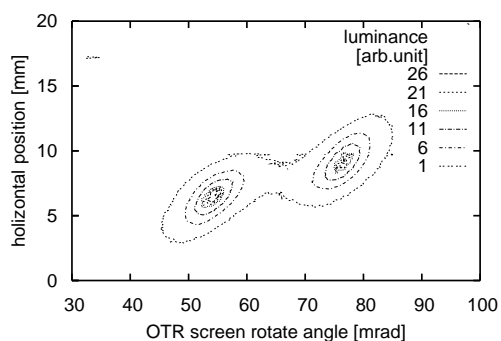


図 4: SUS 鏡面による OTR の角度分布

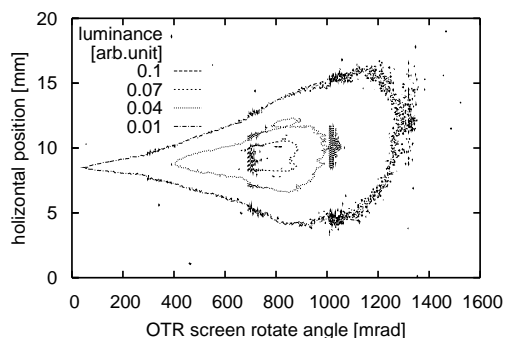


図 5: 粗さ試験片 0.5S70 による OTR の角度分布

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 $12\mu\text{m}$) 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ため 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 $12\mu\text{m}$ 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

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