

チェレンコフ光閾値以下の低エネルギー X 線照射による物質の発光現象の発見

山本 誠一

前回、陽子線照射による、チェレンコフ光ではない水の発光現象の発見を紹介させて頂きました。今回は、少し内容が重複しますが、チェレンコフ光閾値以下の低エネルギーの X 線照射による、水などの物質の発光画像を紹介したいと思います。

高エネルギー X 線照射によりチェレンコフ光が発生することは、すでに知られています。X 線照射によるチェレンコフ光は、X 線と物質との相互作用で発生する電子が、水ではおおよそ 260keV 以上のエネルギーを有すると発生します。このエネルギー値をチェレンコフ光閾値と言います。最も観察しやすい X 線照射による水のチェレンコフ光との一つとしては、治療用のリニアックからの X 線を水に照射したときに生じる発光現象があります。図 1 (A) から (C) は、実験により得られた、リニアックからの 6 MeV の X 線を水ファントムに上方から照射したときのチェレンコフ光画像ですが、鮮明な画像が得られています。

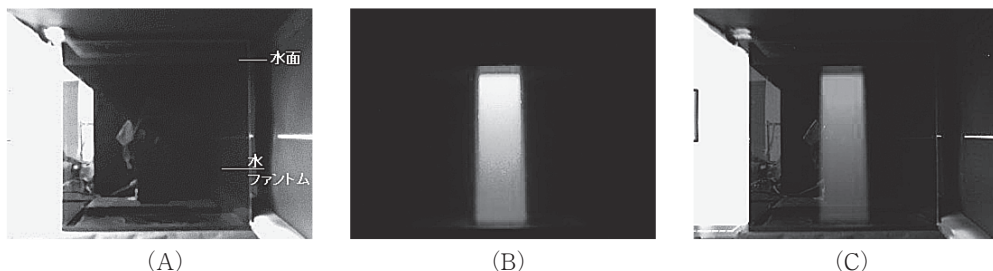


図 1 リニアックを用いたチェレンコフ光画像化に使用した水ファントムの光学画像 (A)、6 MeV の X 線照射による水の発光画像 (B) (疑似カラー表示)、ファントムの光学画像との融合画像 (C) (オレンジの部分が X 線照射による発光)

しかし、リニアックからの X 線照射による、この水の発光画像は、それほど驚くべきものではありません。6 MeV の X 線を水に照射すればチェレンコフ光が発生することは、理論的に予測されるからです。しかし、チェレンコフ光閾値である 260keV 以下の X 線を水に照射したときに、もし発光画像が得られたとしたら、これは驚くべき成果になります。なぜなら、260keV 以下の X 線

が照射されたときに水が発光する現象は、現状知られていないからです。一方で、筆者らは最近、チェレンコフ光閾値以下の陽子線を水に照射したときに、水が発光することを発見し、その画像化に成功しました¹。この結果から類推すると、260keV以下のX線を照射することによっても水は発光し、その分布を画像化できる可能性があると考えました。そこで、診断用のX線撮影装置を用いて、チェレンコフ光閾値よりはるかに低い、最大エネルギーが120keVのX線を、水などの物質に照射し、画像化を試みました。

診断用X線照射による発光画像測定の実験風景の写真を図2に示します。X線は水を満たしたファントムの上方から照射し、撮像にはビットラン製の冷却CCDカメラを用いました。撮像時には、水ファントムとCCDカメラは暗幕で遮光しました。

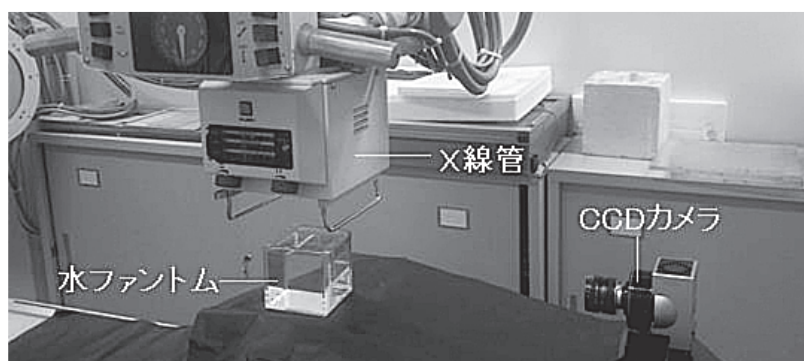


図2 診断用X線照射による水の発光画像測定の実験風景

実験により得られた画像を紹介いたします。図3(A)は、実験に使った水ファントムの光学画像です。この水ファントムに、上方から最大エネルギーが120keVのX線を照射しました。図3(B)に、得られた発光画像を示します。最大エネルギーが120keVのX線ではチェレンコフ光は発生しませんが、水の発光を明瞭に画像化できました。発光画像は、陽子線の入射面付近で強く(画像の上の部分)、深くなるほど輝度は弱くなり(画像の下の部分)、X線の水中における線量と類似の分布を示しました。水の発光がどの部分から生じているかを確認するために、発光画像とファントムの光学画像との融合画像を作成した結果を図3(C)に示します。X線照射による発光はファントムの水の表面から生じていることが確認できます。

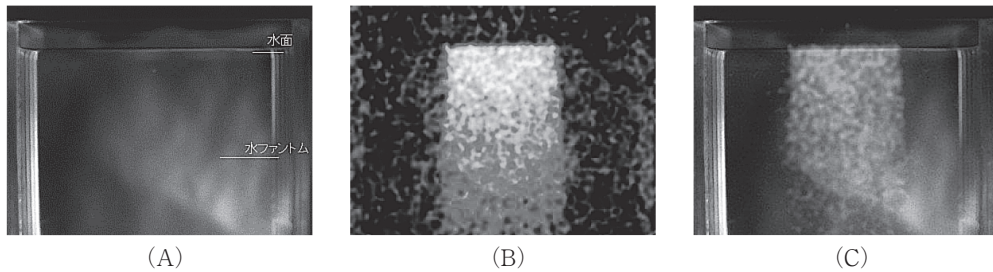


図3 水ファントムの光学画像 (A)、最大エネルギーが120keV の X 線照射による水の発光画像 (B) (疑似カラー表示)、ファントムの光学画像との融合画像 (C) (オレンジの部分が X 線照射による発光)

このように、水がチェレンコフ光閾値以下の低エネルギー X 線照射で発光する現象の画像化に世界で初めて成功しました²。次に、水以外の物質が、チェレンコフ光閾値以下の低エネルギー X 線で発光するのだろうかという疑問がわいてきました。そこで、最大エネルギーが120keV の X 線照射によるアクリルブロックの画像化を試みました。最大エネルギーが120keV の X 線照射では、アクリルブロックでもチェレンコフ光は発生しません。

得られたアクリルブロックの光学画像、発光画像、及び融合画像を、図4 (A) から (C) に、それぞれ示します。アクリルの表面から発光が始まり、水の発光と類似の画像が得られました。またアクリルブロックの発光量は、水に比べ約3.5倍高いことが分かりました。

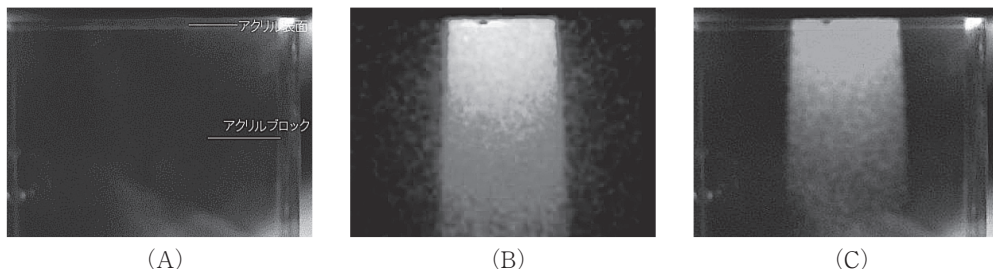


図4 アクリルブロックの光学画像 (A)、最大エネルギーが120keV の X 線照射によるアクリルブロックの発光画像 (B) (疑似カラー表示)、ファントムの光学画像との融合画像 (C) (オレンジの部分が X 線照射による発光)

また、チェレンコフ光閾値以下の X 線照射で生体が発光するかどうか、興味深い点の一つです。そこでと生体類似物質 (スーパーで買った豚肉のブロック) に X 線を照射し、撮像を試みました。豚肉ブロックの光学画像、発光画像、及び融合画像を、図5 (A) から (C) に、それぞれ示します。豚肉ブロックの存在するところに、周辺より高い発光が観察されます。これは豚肉ブロックの表面が X 線により発光し、それが検出されたものと考えられます³。

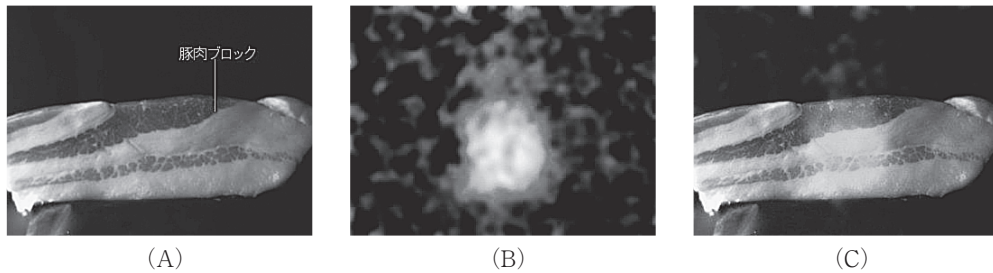


図5 豚肉ブロックの光学画像 (A)、最大エネルギーが120keV の X 線照射による豚肉ブロックの発光画像 (B) (疑似カラー表示)、ファントムの光学画像との融合画像 (C) (オレンジの部分が X 線照射による発光)

このように、チェレンコフ光閾値以下のエネルギーの X 線照射で、水が発光する現象を確認しました。また、水だけでなくアクリルブロックや、豚肉ブロックのような生体類似物質なども発光し、画像化が可能であることを実証しました。これらのチェレンコフ光閾値以下のエネルギーの X 線や粒子線照射による物質の発光は、チェレンコフ光に匹敵する発見であると考えられ、広い学術分野に対して大きなインパクトを与えることが期待されます。発見した現象の発光機序についても研究を進めており、近いうちに報告できると考えています。今後、発見した発光現象の応用研究も進め、科学技術の発展に貢献していきたいと考えています。

謝辞：今回紹介した研究成果は、名古屋大学大学院医学系研究科医療技術学専攻の小山先生、川浦先生、小森先生、小口先生、名古屋大学病院の奥平先生、名古屋陽子線治療センターの歳藤先生らとの共同研究により得られたものです。大変ありがとうございました。

参考文献

1. S. Yamamoto, T. Toshito, S. Okumura, and M. Komori, Luminescence imaging of water during proton-beam irradiation for range estimation, *Medical Physics*, 42 (11), 6498-6506 (2015)
2. S. Yamamoto, S. Koyama, M. Komori, T. Toshito, Luminescence imaging of water during irradiation of X-ray photons lower energy than Cerenkov light threshold, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research-A*. 832 (1), 264-270 (2016)
3. S. Yamamoto, S. Koyama, C. Yamauchi-Kawaura, M. Komori, Luminescence imaging of biological subjects during X-ray irradiations lower energy

than Cerenkov-light threshold, Optical Review, 24 (3), 428-435 (2017)

(名古屋大学大学院医学系研究科医療技術学専攻)

