

## 放射線照射による水の発光現象の発見

山本 誠一

最近、チェレンコフ光ではない、放射線照射による水の発光現象を発見しましたので、その経緯や概要などを紹介したいと思います。

ある種の放射線照射によりチェレンコフ光が発生することは良く知られています。チェレンコフ光は、電子では水中でおおよそ260keV以上のエネルギーで発生し、このエネルギー値をチェレンコフ光閾値と呼びます。多くのベータ線放出核種やポジトロン放出核種からは、このチェレンコフ光閾値以上のエネルギーの電子あるいはポジトロンによるチェレンコフ光が発生することから、光学的検出法と組み合わせて分子イメージング研究などに使われています。また高エネルギーのX線やガンマ線も、物質との相互作用で発生する電子がチェレンコフ光閾値以上のエネルギーを持つことでチェレンコフ光が発生することから、この発光を計測し、線量分布測定へ応用を試みたことなどが報告されています。

しかし、粒子線、例えば陽子線照射による水のチェレンコフ光は、120MeV以下の陽子線照射では理論的に発生しないと考えられていたことから、これまで行われていませんでした。筆者は、名古屋陽子線センターの歳藤博士、名古屋大学の小森博士と共同で、センターの陽子線治療装置を用いて、陽子線ビームを水に照射した際に発生する発光の画像化を試みました。この実験では、100MeVの陽子線を用いたので、これまでの常識から、陽子線による水の発光は検出されないか、あるいは核反応で発生する高エネルギーガンマ線に起因する広がった分布のチェレンコフ光が観察されるかもしれないと予想していました。実際のところ、実験前は、あまり良いデータが得られるとは期待していませんでした。しかし、この予想に反し、測定した画像には、陽子線による水の発光分布が明瞭に撮像されていました<sup>1</sup>。得られた画像にはブラッグピークが観察され、その輝度分布は、水中での陽子線の線量分布に近いもので、大変な驚きでした。この感激的な陽子線画像データを中心に、放射線照射による水の発光測定結果を紹介したいと思います。

陽子線照射による発光画像測定の実験風景の写真を図1に示します。実際の

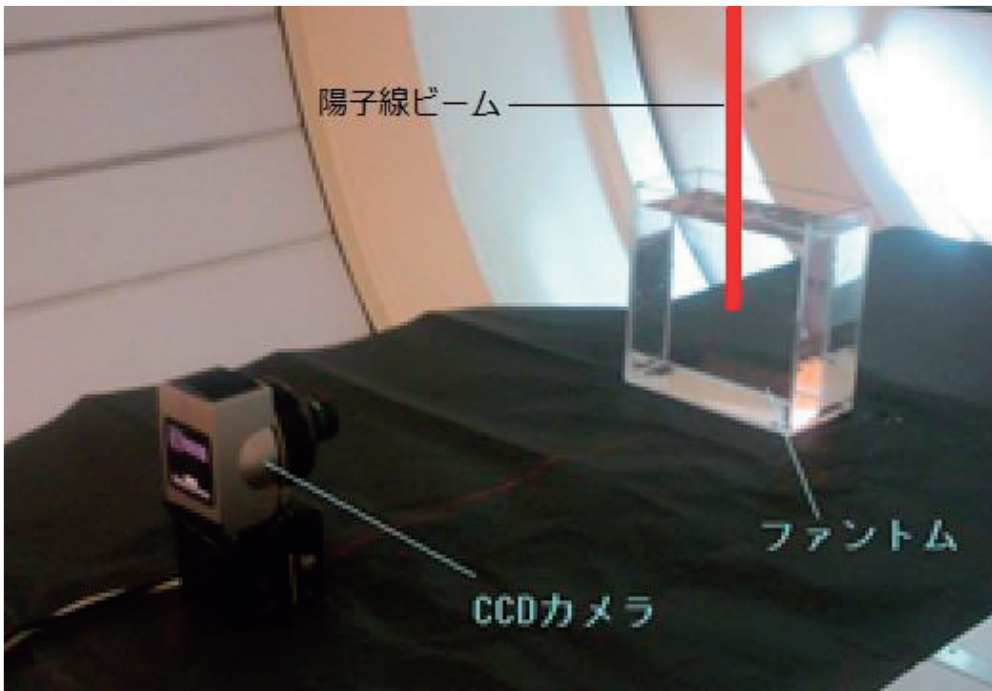


図1 陽子線照射による水の発光画像実験に用いたファントムと CCD カメラの写真

測定時には、周囲からの光が検出されないように、ファントムと CCD カメラを暗幕で覆って撮像します。陽子線はそのファントムの上方から照射し、撮像には主に天体観測に使用される、それほど高価ではない、ビットラン製の冷却 CCD カメラ (BS-40L) を用いました。

実験により得られた画像を紹介いたします。図 2 (A) は、100MeV のエネルギーの陽子線を 1 分間照射したときの水の発光画像です。100MeV の陽子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は弱く (画像の上の部分)、徐々に強くなり、最後に最も強くなり消滅します (画像の下の部分)。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、陽子線照射による発光画像と、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 2 (B) に示します。陽子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。

測定された陽子線による発光画像の輝度が、陽子線の水に対する吸収線量に比例し、また発光画像から陽子線の飛程を算出することができれば、この水の発光画像の応用は広がります。そこで陽子線照射による発光画像の深さ方向 (画像の縦方向) の輝度分布を測定し、電離箱による線量測定値との比較を行いました。図 3 (A) に陽子線照射による発光画像から得られた深さ方向の輝

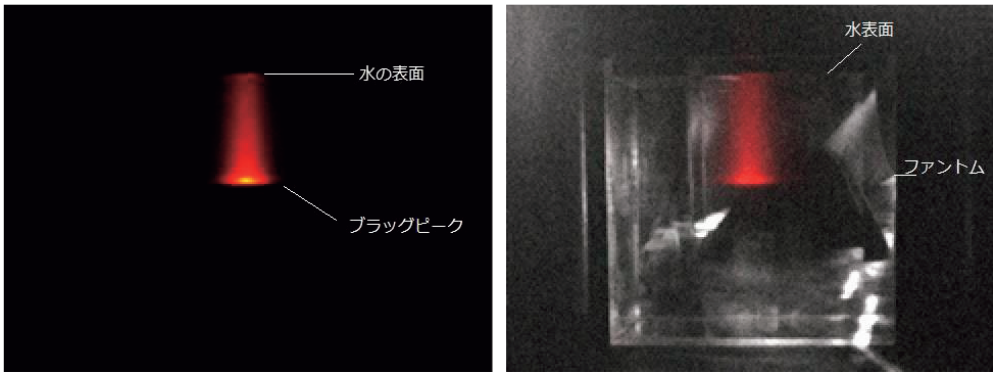


図2 エネルギーが $100\text{MeV}$ の陽子線を照射したときの水の発光画像(A)とファントムの光学画像との融合画像(B) (オレンジの部分が陽子線照射による発光)

度分布を示します。得られた分布は、明確なブランクピークを有することが明らかになりました。図3 (B) に、同じエネルギーの陽子線に対する電離箱で測定された線量分布を示します。陽子線画像から得られた分布は電離箱で得られた線量分布と極めて近い形状を示すことが明らかになりました。また陽子線画像から得られた陽子線と電離箱で得られた飛程を比較したところ、その値はほぼ一致しました。したがって、この発光画像は、水中における陽子線の飛程の評価に使えることが明らかになりました。

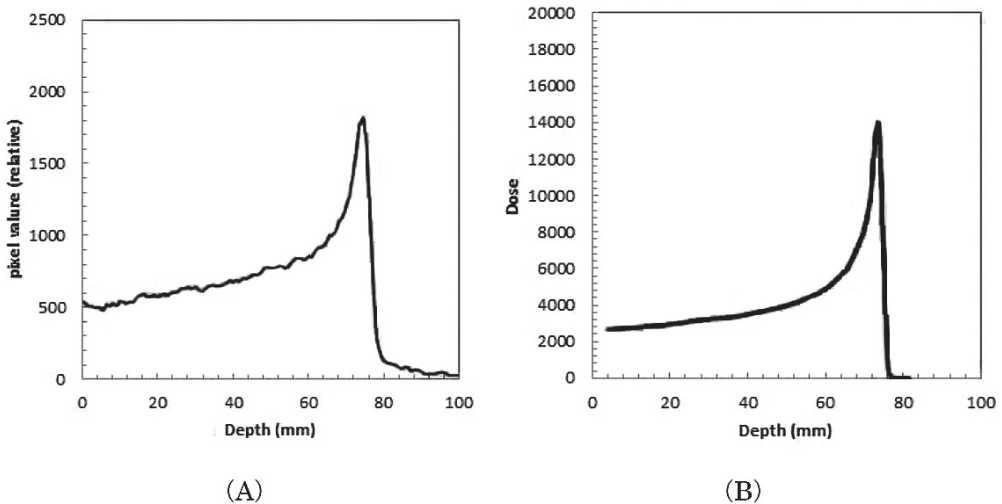


図3 陽子線照射による発光画像から得られた深さ方向の輝度分布(A)と電離箱により得られた深さ方向の線量分布(B)

陽子線ビームを水に照射した際に発生する微弱光を明瞭に画像化することができましたが、この発光は一体何に起因するのでしょうか。理論的にはチェレ

ンコフ光とは考えられません。水に含まれる不純物が発光しているのではないかと言われることがありますが、この点は水道水と純水で比較実験を行い、発光分布、強度ともに変化がないことを確認済みです。筆者らは、検出した微弱光は、陽子線照射で水に生じたフリーラジカルの発光に起因すると考えています。フリーラジカルは放射線が水などに反応して発生し、放射線における生体影響の間接効果に関係することが知られています。プラズマにより発生するフリーラジカルは発光することが良く知られており、放射線によるラジカルも発光することは十分に考えられます。

もし、この発光がフリーラジカルのよる発光であれば、他の放射線の照射でも、水は発光するはずですが、そこで、チェレンコフ光が発生しないエネルギーの炭素線、 $\alpha$ 線、及びX線を水に照射しながら高感度 CCD カメラで撮像する実験を行いました。その結果、それらすべての種類の放射線により水は発光し、また明瞭な発光画像を得ることができました<sup>2)-5)</sup>。このチェレンコフ光ではない、放射線照射による水の発光現象の発見は、チェレンコフ光の発見に匹敵する画期的なものと考えられています。今後、放射線による水の発光に関して、発光機序の解明などの基礎的な実験を進めるとともに、この発見の応用研究を進めることで、医学あるいは理工学において広く使われる技術に発展させ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、名古屋陽子線治療センターの歳藤博士、名古屋大学の小森博士、小山博士、兵庫県立粒子線医療センターの赤城博士、山下博士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, M. Komori, S. Koyama, T. Toshito, Luminescence imaging of water during alpha particle irradiation, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research-A*, 819(21), 6-13 (2016)
3. S. Yamamoto, M. Komori, T. Akagi, T. Yamashita, S. Koyama, Y. Morishita, E. Sekihara and T. Toshito, Luminescence imaging of water during carbon-ion irradiation for range estimation, *Medical Physics*, 43, 2455-2463 (2016)

4. 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)
5. S. Yamamoto, T. Toshito, T. Akagi, T. Yamashita, M. Komori, Scintillation imaging of air during proton and carbon-ion beam irradiations, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research-A, 833(11), 149-15 (2016)

(名古屋大学医学部保健学科教授)

