

偏光フィルター：炭素線ビームに平行方向      偏光フィルター：炭素線ビームに垂直方向

## 偏光現象を利用し、粒子線照射による水の発光画像からチェレンコフ光の分離に成功 ～粒子線がん治療の線量評価などへの応用に期待～

名古屋大学大学院医学系研究科総合保健学専攻の山本 誠一 教授、平野 祥之 准教授、矢部 卓也 大学院生、兵庫県立粒子線医療センターの赤城 卓 博士は、がん治療に用いる炭素線<sup>注1)</sup>を水に照射したときに生じる発光画像<sup>注2)</sup>に含まれるチェレンコフ光<sup>注3)</sup>が偏光している性質を利用し、その成分を、偏光フィルターを利用することにより分離し、正確な線量画像<sup>注4)</sup>を得ることに成功しました。

陽子線や炭素線などの粒子線がん治療ビームの線量分布を短時間に正確に測定することは、粒子線治療の現場で切望されています。山本教授らは、これまでに粒子線が水中で微弱光を発することを発見し、この光を高感度カメラで撮像することで粒子線が水に与える線量と類似の分布を画像化できることを報告しました。しかし、得られた画像にはチェレンコフ光に起因する発光が含まれることがあり、線量と分布が異なる問題点がありました。山本教授らはチェレンコフ光が進行方向に偏光している性質に着目し、偏光フィルターにより、チェレンコフ光成分を分離することを試みました。

その結果、偏光フィルターの方向を変えることで、微弱光は変化がなく、チェレンコフ光には異なる分布が得られました。また画像間の演算によりチェレンコフ光のみの画像を分離して得ることに成功しました。さらに分離したチェレンコフ光を用いて実測画像からチェレンコフ光成分を除去することで線量画像<sup>注4)</sup>を生成することにも成功しました。

これまで分離が不可能であった、水の微弱光とチェレンコフ光を光学的に分離でき、チェレンコフ光の除去に使えることを示した世界初の成果です。今後、粒子線治療のみならず、偏光が関係する放射線物理研究に応用されることが期待されます。

本研究成果は、2020年11月20日付米国医学物理学専門誌である Medical Physics 誌に掲載されました。

### 【ポイント】

- ・チェレンコフ光は偏光しており、偏光フィルターの方角を変えることで異なる画像が得られることを明らかにした。
- ・粒子線照射により発生する水の微弱光は、偏光していないことを明らかにした。
- ・偏光フィルターの方角を変えて得られた画像を演算することでチェレンコフ光のみの画像を得ることに成功した。
- ・チェレンコフ光のみの画像を用いて、測定画像から線量画像を得ることに成功した。

### 【研究背景と内容】

粒子線がん治療は、粒子線が選択的に高線量を腫瘍に与えることが可能なため、注目を集めています。粒子線治療においては、粒子線がビームの終端に多くの線量を与えるため、腫瘍に多くの線量を与えることが可能ですが正確な照射が求められ、粒子線ビームの到達位置や広がりなどの品質管理が重要になります。山本教授らは、これまでに放射線を照射することで水が発光することを発見し、この発光画像を粒子線治療ビームの品質管理に応用する研究を進めてきました。放射線照射による水の発光現象は、水を満たした透明容器に粒子線を照射すると、これまで発生するとは考えられなかった微弱光が水中で発生するという現象で、発光が放射線の線量と比例する性質を持ち、医学物理学のみならず広い分野で注目を集めています。

しかし、この水の発光は、エネルギーの高い炭素線を水に照射したときには、水の微弱光と共に、チェレンコフ光が水の浅い部分に発生し、発光画像を歪ませるという問題がありました。水の微弱光とチェレンコフ光の発光波長は似ており、発光波長の情報などを用いて分離することは、これまで不可能でした。しかし、今回、山本教授らはチェレンコフ光が進行方向に偏光している性質に着目し、偏光フィルターによりチェレンコフ光成分を分離できるのではないかとに着目に至りました。

図1左図に計算で求めた、炭素線を水に照射したときに生成する電子の飛ぶ方向を示します。生成する電子は主に、前方方向に放出されます。前方方向に放出された電子が発生するチェレンコフ光は、進行方向に対して、円錐状に放出されることが知られています（図1右図）。この特徴的なチェレンコフ光の性質に加え、山本教授はチェレンコフ光が進行方向に偏光している可能性のあることに着目しました。

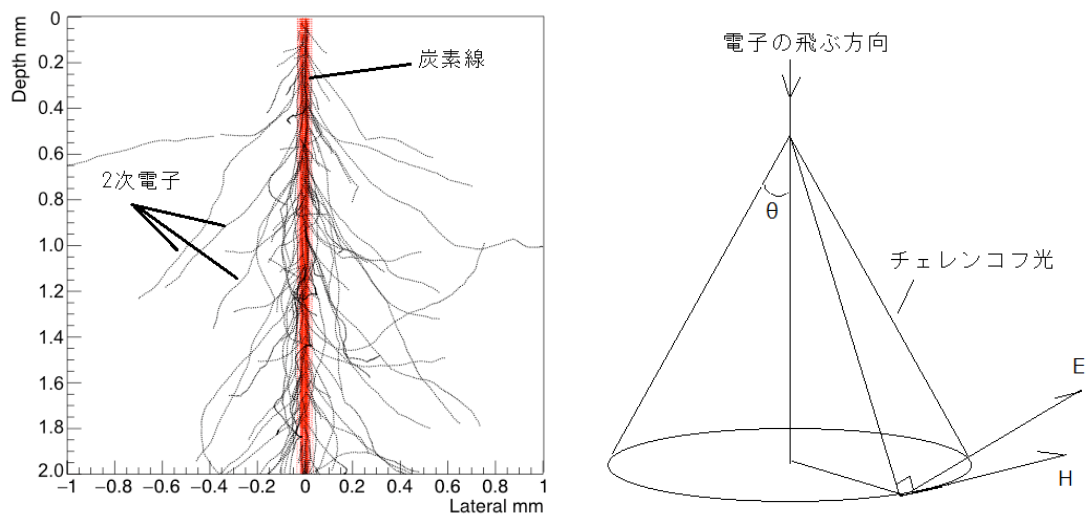


図1 炭素線を水に照射したときに発生する2次電子の飛跡（飛ぶ方向）（左図）とチェレンコフ光の発生方向の模式図（右図）

偏光している光は偏光フィルターを用いることにより、通過させたり、除去したりできる可能性があります。一方で、放射線照射時に発生する微弱光は偏光しているかどうかは全く不明でした。そこで、図2に示す発光画像測定装置を用いて、炭素線照射時の発光を、偏光フィルターの方を変えて撮像しました。

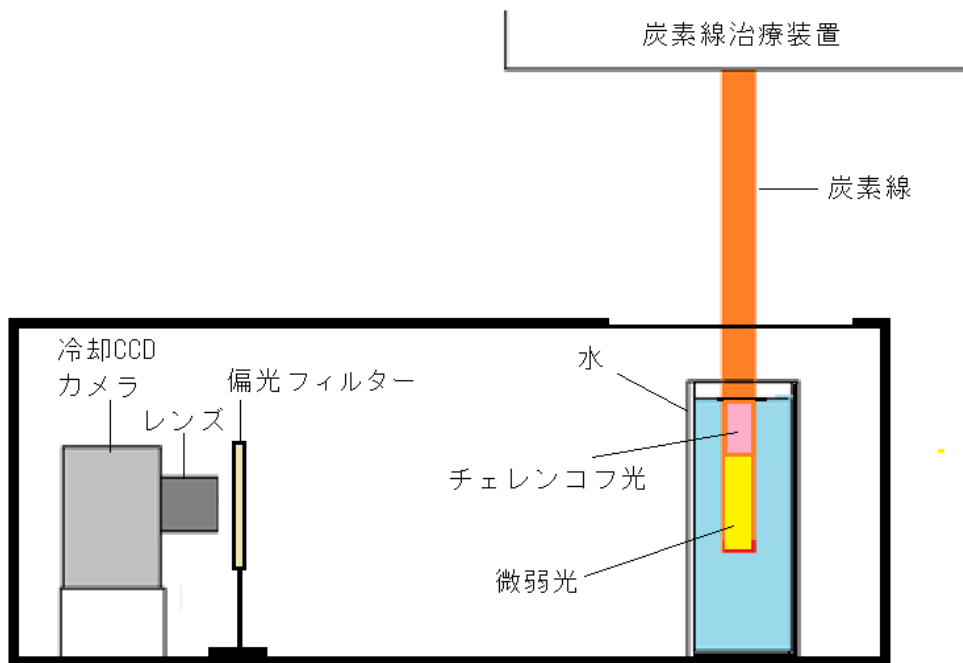
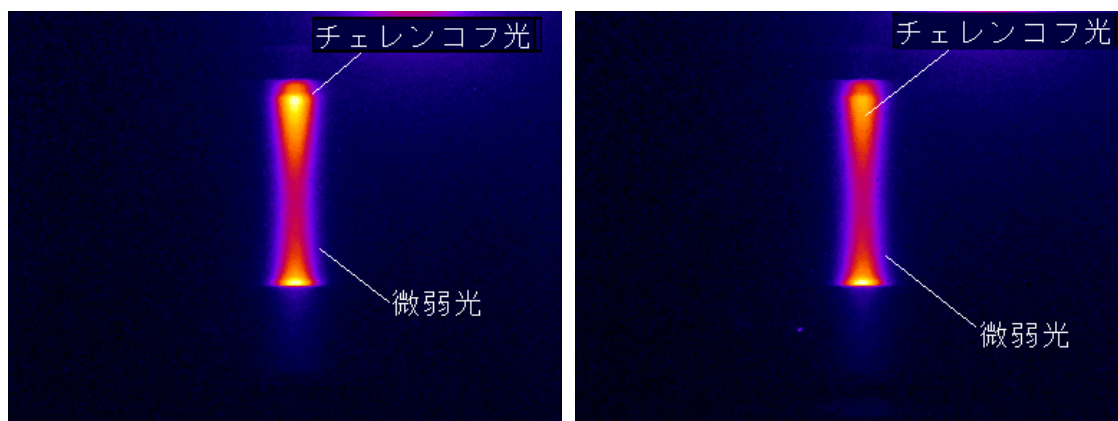


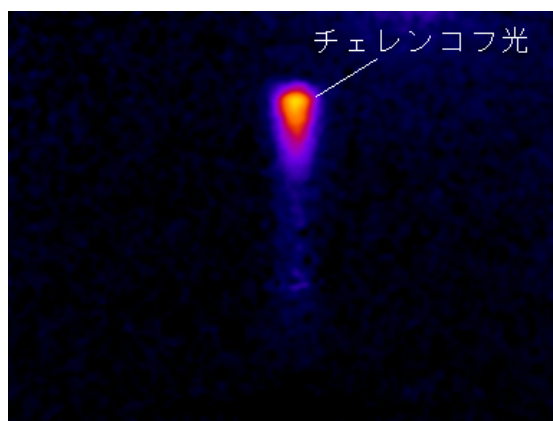
図2 粒子線を照射したときに生じる水の発光のチェレンコフ光を分離測定する装置の模式図。偏光フィルターを用いることで異なる画像が得られた。

その結果、図3に示すように、水の浅い部分に生じるチェレンコフ光の輝度に違いのある画像が得られました。予想通り、偏光フィルターが炭素線ビームに平行な場合に高輝度のチェレンコフ光画像が得られました。一方で、水の微弱光の輝度は偏光フィルターの方に無関係で、偏光していないことが分かりました。ビームに平行方向の画像からビームに垂直方向の画像を引き算することで、チェレンコフ光の分布を得ることに成功しました。



偏光フィルター：炭素線ビームに平行方向

偏光フィルター：炭素線ビームに垂直方向



引き算画像（チェレンコフ光画像）

図3 偏光フィルターを炭素線ビームに平行方向にして撮像した炭素線照射時の水の発光画像（上左図）：上のほうにチェレンコフ光による高い輝度の分布が観察される。偏光フィルターを炭素線ビームに垂直方向にして撮像した画像（上右図）：チェレンコフ光の輝度が少し小さい。引き算画像（下図）：チェレンコフ光の分布のみが観察される。

チェレンコフ光のみの分布が得られたので、この画像をチェレンコフ光の補正に用いることが可能になりました。炭素線照射時に得られた発光画像から、チェレンコフ光画像を引き算することで、線量画像を得ることができました（図4左）。深さ方向の分布は電離箱で測定した線量分布と類似で、チェレンコフ光の影響を除去できたことが確認できました（図4右）。

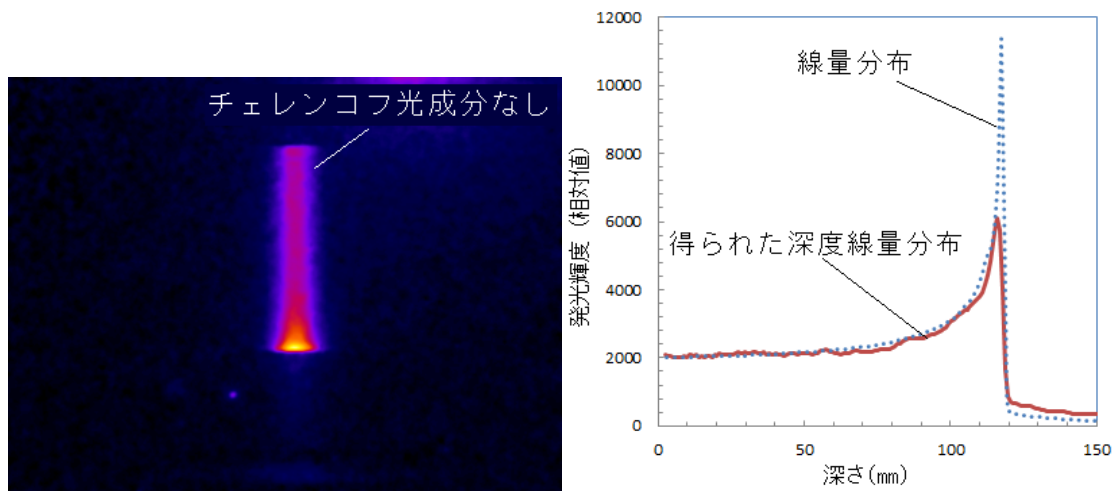


図4 炭素線照射時に得られた発光画像から、チェレンコフ光画像を引き算することで得られた線量画像（左）と深さ方向の線量分布（右）

#### 【成果の意義】

本研究では、これまで分離が不可能であった、水の微弱光とチェレンコフ光を、偏光フィルターを用いて光学的に分離でき、チェレンコフ光の除去に使えることを世界で初めて示しました。一方で、発見した水の微弱光が偏光していないことも明らかにしました。偏光フィルターを用いたチェレンコフ光分離の手法は、放射線照射で発生する種々の発光現象に応用できる可能性があります。今後、粒子線のみならず偏光が関係する放射線物理研究に利用されることが期待されます。

#### 【用語説明】

- 注1) 炭素線：炭素粒子を加速し、患者の腫瘍に照射することで治療を行う放射線治療に使われるビームの一種。線量を腫瘍に集中して与えることができるため、治療効果が大きい利点があります。
- 注2) 水に照射したときに生じる発光画像：従来、低いエネルギーの放射線照射では、水は発光しないと考えられていました。しかし、この常識に反し、山本教授らは、数年前に低いエネルギーの放射線照射で水が発光することを明らかにしました。
- 注3) チェレンコフ光：従来から知られていた水の発光現象。一定以上のエネルギーの放射線を水などに照射すると発光する現象で、チェレンコフが発見し、ノーベル賞を受賞しています。
- 注4) 線量画像：粒子線治療では、患者に粒子線を照射したときにどの部分に、どの程度の放射線の影響があるかを知った上で粒子線を照射し治療を行います。この放射線を照射された対象が受ける作用の大きさを示す量を線量といい、作用の大きさを表す画像を線量画像と言います。線量画像は、実測が困難なため通常は計算により求めています。

**【論文情報】**

雑誌名 : Medical Physics (米国医学物理学専門誌)

論文名 : Imaging of polarized components of Cerenkov-light and luminescence of water during carbon ion irradiation

著者 : Seichi Yamamoto, Takuya Yabe, Takashi Akagi, Yoshiyuki Hirano (山本 誠一、矢部 卓也、赤城 卓、平野 祥之)

DOI : 10.1002/mp.14600