

## 別紙 4

|      |   |   |   |
|------|---|---|---|
| 報告番号 | ※ | 第 | 号 |
|------|---|---|---|

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 粒子線照射により生じる水の発光現象を用いた線量分布  
評価法に関する研究

氏 名 矢部 卓也

## 論 文 内 容 の 要 旨

**1. 背景・目的**

陽子線や炭素線を用いた粒子線治療は、ビーム終端で線量が最大となるブラッグピークを有するため、従来の X 線を用いた放射線治療と比べて腫瘍への線量集中性に優れた利点を有する。しかし、何らかの原因でブラッグピーク的位置が腫瘍の位置からずれた場合、治療効果の低下や正常組織への障害を引き起こす可能性がある。こうした事態を回避するために、臨床現場では定期的に粒子線治療装置から照射される治療ビームの線量分布を測定し、ビームの到達位置(飛程)や広がり进行评估している。線量分布の測定には主に電離箱線量計が用いられるが、水槽内に配置した線量計を動かしながら、治療ビームの照射と線量の測定を繰り返すため、測定時間が長くなる。短時間かつ簡便に粒子線の線量分布を評価できる新たな手法が、臨床現場で要求されている。

光計測を用いた線量測定は放射線治療における線量分布を、短時間かつ簡便に評価できる新たな手法として注目されているが、チェレンコフ光を放出する放射線のみにはしか利用されていなかった。水におけるチェレンコフ光放出閾値以下の放射線照射では、理論的に水は発光しないと考えられていたからである。しかし最近、チェレンコフ光放出閾値以下のエネルギーを有する粒子線を水に照射した際に微弱な光が発生することが確認され、高感度カメラにより発光の画像化が可能であることが明らかになった。水の発光画像は粒子線特有のブラッグピークを示し、飛程は線量分布のそれとよく一致した。水の発光現象の画像化は、電離箱線量計を用いた線量分布測定法よりも短時間で粒子線の線量分布を測定できる可能性があるため、粒子線治療における照射装置の精度管理などへの応用が期待される。しかし撮像された水の発光画像の輝度分布が、線量

分布と違いが生じるため、発光画像を用いて線量分布を評価することは、これまで困難であった。この問題を解決するため、本研究では、粒子線照射により得られる水の発光画像から線量分布評価を可能にする手法を開発する。

## 2. 方法

水の発光画像と線量分布の違いの原因は、粒子線照射より発生する二次粒子に起因したチェレンコフ光が水の発光に含まれるからであると推測した。まずモンテカルロシミュレーションにより、粒子線照射により水から発生するチェレンコフ光成分を推定し、その成分を補正に用いることで水の発光画像から線量分布を求めることを試みた。また、シミュレーションにより推定したチェレンコフ光成分を水の発光画像の深部分布から差し引くことで、水の発光画像に含まれるチェレンコフ光の影響を補正することを試みた。

シミュレーションによるチェレンコフ光の発光成分の推定には、計算時間を要する。この問題点を克服するため、ディープラーニングを用いることで水の発光画像から粒子線の線量分布を短時間で推定することを試みた。ディープラーニングでは大量の学習データが必要となるため、粒子線照射により生じる水の発光画像とその画像に対応する線量分布画像を、モンテカルロシミュレーションにより 2600 組作成した。ディープラーニングのネットワークモデルには画像内の局所的特徴と全体的位置情報を統合して学習可能な U-Net モデルを採用し、作成した画像データセットの学習および線量分布画像の推定を行なった。学習した U-Net モデルを用いて、実測された陽子線および炭素線の水の発光画像から線量分布画像を推定した。さらにシミュレーションで得られた線量分布画像との比較を行ない、ネットワークモデルの推定精度を評価した。

## 3. 結果

陽子線では、水との核反応で生じた即発ガンマ線の二次電子がチェレンコフ光の発生に最も寄与しており、そのチェレンコフ光は、陽子線のブラッグピークよりも深部に分布した。一方、炭素線では入射した炭素線から発生する二次電子が最もチェレンコフ光の発生に寄与しており、その分布は水面付近で多く発生した。

陽子線では、チェレンコフ光の補正により、水の発光画像のブラッグピーク部の相対輝度は上昇し、線量分布におけるブラッグピーク部の高さと同等になった。さらにブラッグピークより深部の発光を除去することができ、水の発光画像から陽子線の線量分布と一致する発光分布を得ることに成功した。炭素線ではチェレンコフ光の補正により、発光画像で観察された水面付近の高い発光は減少した。しかし補正後の発光分布のブラッグピークの相対輝度は、線量分布のブラッグピーク部の高さよりも少し低い結果となった。

一方で、ディープラーニングを用いることで、陽子線や炭素線照射時に実測

された水の発光画像から実際の線量分布に一致した画像を推定することができた。実際の線量分布との誤差を示す **Root Mean Squared Percent Error (RMSPE)** は、発光画像では 4.4%であったが、ディープラーニングの推定画像では 1.4%まで減少した。実際の線量分布との類似度を示す **Structural Similarity Index Measure (SSIM)** は、実測で得られた発光画像では 65.7%であったが、ディープラーニングで得られた推定画像では 96.4%となり、高い類似度を示した。さらに、学習したネットワークモデルは 1.0 秒以内に線量分布画像を推定できることを確認した。

#### 4. 結論

粒子線治療における線量分布評価実現のため、高感度カメラにより撮像された水の発光画像から線量分布を求める手法を開発した。水の発光画像に含まれるチェレンコフ光は、線量分布との違いに大きな影響を与えており、その成分を補正することで線量分布と同等の発光分布を得ることが可能なことを明らかにした。またディープラーニングを用いることで、シミュレーションによるチェレンコフ光成分の推定を行わずに、水の発光画像から線量分布を短時間に推定できることも明らかにした。水の発光現象の画像化手法は、本研究で開発した補正法と組み合わせることにより、粒子線治療における線量評価や照射装置の精度管理に応用されることが期待される。