

2016年 1月提出

学籍番号 1Y12B058-7

|      |                                    |    |       |     |        |
|------|------------------------------------|----|-------|-----|--------|
| 所属学科 | 応用物理                               | 氏名 | 高部 美帆 | 指導員 | 片岡 淳 印 |
| 研究題目 | 高精度陽子線治療に向けた CCD カメラ陽子線 CT システムの開発 |    |       |     |        |

## 1. 研究背景

がん治療において近年急速に普及している陽子線治療は、その高い線量集中性ゆえに精度の良い照射が求められる。現状の陽子線治療計画では、X線 CT 画像より体内の構造を把握し、ここで得られる線減弱係数 (CT 値) をもとに陽子線の阻止能を算出している。一方で、非荷電粒子である X 線と荷電粒子である陽子線では物質との相互作用が全く異なるため、計算には多くの不定性が残る。この問題を解決するため、陽子線そのもので体内の構造を直接取得し、陽子阻止能の情報を得る「陽子線 CT」の研究が提案されている。代表的な手法として、シリコンストリップ検出器を用いて陽子の飛跡を追跡する方法があるが[1]、実験装置が大きく計算が複雑であり、未だ実用化には至っていない。また、被写体を透過した陽子線をシンチレータで全吸収し、その発光を CCD カメラで測定する手法もあるが、実際の治療に必要な 200MeV 程度の高エネルギー陽子は水中での飛程が 25cm にも及び、シンチレータ内部での多重クーロン散乱や光の拡散の影響で精度の高い画像取得が困難となる。本研究では、飛程に対して十分薄いプラスチックシンチレータ (70MeV では 5mm 厚、200MeV では 50mm 厚) と CCD カメラを用いることで、新たな陽子線 CT システムの開発に挑戦した。

## 2. 陽子線 CT による画像評価

画像再構成における物理量として、水中での陽子線の飛程を表す WEL (water equivalent length) という指標を用いる。

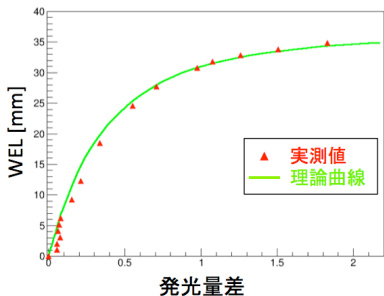


図 1 70MeV 陽子線による  
光量レンジ変換テーブル

WEL は陽子阻止能と比例関係にある。様々な厚みの被写体を置く場合と何も置かない場合での発光量差を横軸に、WEL を縦軸にとった光量レンジ変換テーブルの一例を図 1 に示す。再構成時には、このテーブルを用いて測定データを WEL に変換する。

初めに、放医研サイクロトロンにおいて 70MeV, 30nA の陽子線照射実験を行った。再構成した CT 画像を図 2 に示す。被写体の周囲が白く不鮮明になる原因は、被写体での陽子線多重散乱の影響と考えられる。上部にあいた穴は直径 1mm であり、一次元プロファイルより得られる直径は 1.67mm (FWHM) であった。放射線治療におけるマージン (患部周囲に設ける余分な照射領域) は数 mm 以上であるため、十分な精度といえる。

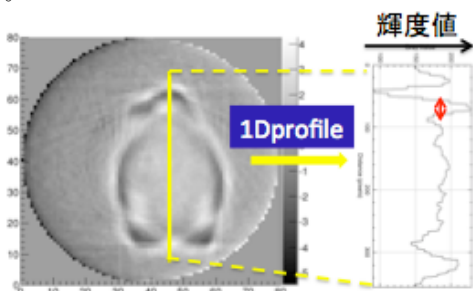


図 2 70MeV 陽子線による CT 撮影

次に、名古屋陽子線治療センターで 200MeV, 10nA の陽子線照射を行い、円筒型水ファントムを撮影した。図 3 に示すとおり、被写体と空気との境界部分の鮮鋭度 (画像の明瞭さを表す) は 6.5 度であった。臨床応用では 200MeV 付近での照射が不可欠であるが、シンチレータ内での陽子線や光の散乱が十分抑えられるという点で薄いシンチレータの有用性が示された。

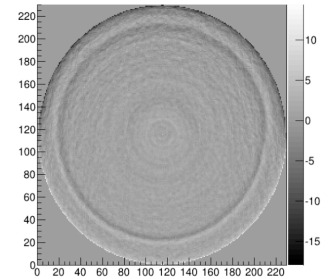


図 3 200MeV 陽子線による  
水ファントムの再構成画像

## 3. X 線 vs 陽子線照射による物質同定

水・アクリル・イソプロパノールの 3 種の物質に関して、X 線照射により CT 値を取得し、70MeV と 200MeV の陽子線照射により得られた WEL と比較した。水を基準値 1 としたときの比較結果を図 4 に示す。X 線 CT では差が見られない水とイソプロパノールを、陽子線 CT により明確に分離することに成功した。70MeV 陽子線照射においてアクリルの WEL が理論値よりも 5% 大きく見積もられる原因として、シンチレータの放射線劣化により光量や波長がわずかに変化し、結果として変換テーブルに誤差が生じていることが考えられる。また、200MeV 陽子線照射においてイソプロパノールの WEL が理論値よりも 12% 大きく見積もられる。この原因は、WEL が小さいと発光量差も小さく、ノイズの影響が顕著になるからだと考えられる。

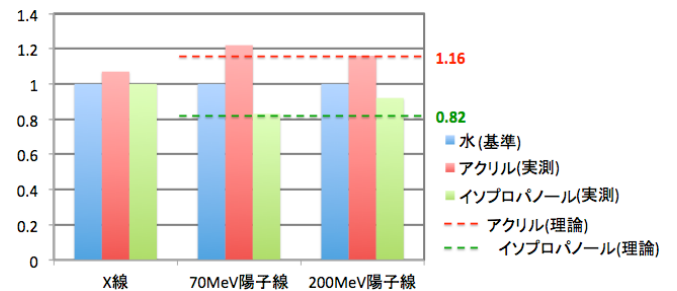


図 4 3 種の物質の線減弱係数と WEL の比較

## 4. まとめと今後の展望

薄いシンチレータと CCD カメラを組み合わせた簡便かつコンパクトな陽子線 CT システムによって、陽子線治療に必要な 200MeV でのイメージングに成功した。さらに WEL を再構成パラメータに用いることで、X 線 CT では困難であった物質の弁別にも成功した。臨床応用を考える際には 1mm 以下の空間分解能と高い WEL 測定精度が必要となる。今後は被写体での多重クーロン散乱の影響を補正する手法の検討を行い、発光量が多い GOS (Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Pr) 増感フィルムなどを用いて、より低レートかつ低線量下での陽子線 CT 撮影を行うことを検討している。

## 5. 参考文献

[1] Vladimir A. Bashkurov, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 809 (2016) 120–129 .