

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 06 月 01 日現在

機関番号：32643

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23791451

研究課題名（和文）

フォトンカウンティングを利用した医療用小型スペクトロメータの開発

研究課題名（英文）

A development of small spectrometer for clinical use

研究代表者

古徳 純一 (KOTOKU JUNICHI)

帝京大学・医療技術学部・講師

研究者番号：70450195

研究成果の概要（和文）：

本研究は、放射線治療の医療現場で用いられる小型線形加速器（リニアック）から出力される X 線光子のエネルギースペクトルの推定方法の基礎開発を目指すものである。EGS5 を用いて、PDD 取得用の水槽をモデル化し、単色光子に対するシステムの応答関数を構築した。PDD は、上記の方法で求めた応答の線形結合で表されると仮定し、事後確率最大化法（MAP）推定を用いて PDD から光子のエネルギースペクトルを推定した。エネルギースペクトルの事前分布としては、モンテカルロシミュレーションによる結果を用いた。この手法による解の決定は比較的頑健であり、治療計画器中のエネルギースペクトルとの比較でも矛盾のない結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

The energy spectrum of a clinical photon beam constitutes the most upstream information and is critical in dose distribution. However, the technical difficulty of photon counting has hampered attempts to determine this energy spectrum. In this paper, we present a scheme that infers the X-ray energy spectrum of a linear particle accelerator on the basis of the percentage depth dose (PDD) in an ion chamber.

We assumed a linear relationship between the clinical photon beam spectrum and the PDD of the beam. The photon spectrum was then estimated as a solution of maximum a posteriori. The PDD of 4-MV X-rays was measured using an ion chamber and a three-dimensional water phantom in Teikyo University Hospital.

Our inference method proved to be effective and powerful in estimating the X-ray energy spectrum. The estimated spectrum closely matched the spectrum modeled in the commercial treatment planning system. Although our method is tested only on a single case, the method is validated by its successful output.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：逆問題、エネルギースペクトル推定、PDD

## 1. 研究開始当初の背景

近年、特に光子、電子を使用した、がんの放射線治療、放射線診断は長足の進歩を遂げ、中小規模の病院でさえ当前の技術となった。しかしながら、それらの装置の精度検証の際に、ターゲット直下の X 線初期エネルギースペクトルは、もっぱらモンテカルロシミュレーションの結果を信じるか、あるいは、非常に大雑把な測定で代用しているのが、我が国のみならず、国際的な状況である。これでは、どんなに精緻な計算をその後に行うとしても、砂上の楼閣の感は否めない。今日の治療に求められる精度は今や 2-3% である。10 年前とは隔世の精度が求められているなかで、この部分だけ 30 年前と同じで良いはずはない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、X 線のエネルギースペクトルを直接測定する、小型スペクトロメータの開発である。本研究では、医療用直線加速器から放射される高フルエンス率の光子ビームに対して動作可能な X 線のエネルギースペクトル推定方法の確立を、一般の病院での使用を目標に据えて、鍵となる要素技術の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

### 1) 検出器の基礎的な構築による原理の確認

リニアックからの X 線の強度を十分に下げれば、シンチレータを使ったエネルギー弁別によって、X 線エネルギースペクトルをとることが可能かどうか、実験を行った。

X 線を放射するリニアックのガントリの後段に、真鍮製のコリメータ 2 つと、タングステンの減衰版を設置し、光子数を減弱させる。減弱した光子は、鉛ブロックに囲まれて遮蔽された NaI シンチレータで検出され、シンチレーション光は後段の光電子増倍管および読み出し系を通してスペクトルとして記録される。この基本原理が動作するかどうか、実際に確かめた。

### 2) 逆問題の解法のプロトタイプを作成

リニアックからの X 線エネルギースペクトルの推定は、測定されたエネルギースペクトルから真のエネルギースペクトルを推定する逆問題と考えることができる。一般に逆問題を解くための手法は、一般化逆行列を解く決定論的な手法と、統計的な推定方法に分類で

きるが、今回、プロトタイプとして採用したのは、両者の中間である逐次近似法である。検出器への光子の入射エネルギーに対しての、検出器の応答は、事前に EGS5 を使ったモンテカルロシミュレーションで求めておく。これらの応答を、逆問題の解析に使用するために応答関数という形式でまとめる。

### 3) PDD からのエネルギースペクトル推定

本研究は、放射線治療の医療現場で用いられる小型線形加速器（リニアック）から出力される X 線光子のエネルギースペクトルの推定方法の基礎開発を目指すものである。平成 24 年度は、PDD（深部線量百分率）からエネルギースペクトルを推定する手法の開発を行った。

PDD の単色光子に対する応答は、基本的に多数の散乱過程を含むので、モンテカルロシミュレーションで作成する必要がある。そこで、EGS5 を用いて、PDD 取得用の水槽をモデル化し、システムの応答関数を構築した。線形加速器から生じる X 線は制動放射由来であり、連続スペクトルであることが期待されるので、PDD は、上記の方法で求めた応答の線形結合で表されると仮定し、事後確率最大化法（MAP）推定で光子のエネルギースペクトルを推定した。エネルギースペクトルの事前分布としては、モンテカルロシミュレーションによる結果を用いた。

## 4. 研究成果

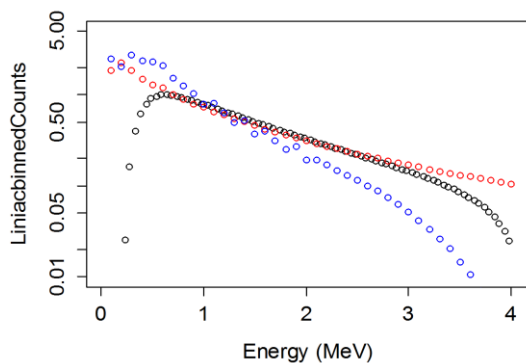
### 1) 検出器の基礎的な構築による原理の確認

X 線を放射するリニアックのガントリの後段に、真鍮製のコリメータ 2 つと、タングステンの減衰版を設置し、光子数を減弱させる。減弱した光子は、鉛ブロックに囲まれて遮蔽された NaI シンチレータで検出され、シンチレーション光は後段の光電子増倍管および読み出し系を通してスペクトルとして記録される。平成 23 年度は、この検出器のセットアップが医療用リニアックからのエネルギースペクトルの測定に使用できることを確認した。



## 2) 逆問題の解法のプロトタイプの作成

リニアックからの X 線エネルギースペクトルの推定は、測定されたエネルギースペクトルから真のエネルギースペクトルを推定する逆問題と考えることができる。検出器の応答（単色エネルギーに対する装置へのエネルギー付与）は、事前に EGS5 を使ったモンテカルロシミュレーションで求めておき、この応答関数を特異値分解することで、厳しい劣決定問題であることがわかった。そのため、エネルギースペクトルのノルムを正則化項にとって、リッジ回帰を行うことで、もともとの X 線エネルギースペクトルを推定した。今回の実験では、このエネルギースペクトル推定を、過去の文献のモンテカルロシミュレーションの結果と比較し、矛盾のない結果が得られたことを確認した。これらの研究成果を、アメリカ医学物理学会（AAPM）での口頭発表、プロシーディング、第 103 回日本医学物理学会学術大会での口頭発表として発表した。



図：X 線エネルギースペクトルの推定。入射スペクトル（黒）に対する、推定スペクトル（赤、青）

## 3) PDD からのエネルギースペクトル推定

本研究は、放射線治療の医療現場で用いられる小型線形加速器（リニアック）から出力される X 線光子のエネルギースペクトルの推定方法の基礎開発を目指すものである。平成 24 年度は、PDD（深部線量百分率）からエネルギースペクトルを推定する手法の開発を行った。

現在どの病院でも測定可能な PDD を使って、X 線のエネルギースペクトルを推定することができれば、手軽に自分の病院の線形加速器から出力される X 線エネルギースペクトルの正しさを検証できることになる。PDD は、本来、X 線エネルギースペクトルの情報を反映するはずであるから、PDD から逆問題としてエネルギースペクトルを推定できるはずだ

というのが着眼点である。

この手法では、測定 PDD を  $\mathbf{t}(\mathbf{x}, \mathbf{w})$  で表し、 $\mathbf{x}$  は深さベクトル、 $\mathbf{w}$  はエネルギースペクトルを表すとすると、

$$\mathbf{t}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sum_{i=1}^M w_i \phi_i(\mathbf{x}) + \epsilon$$

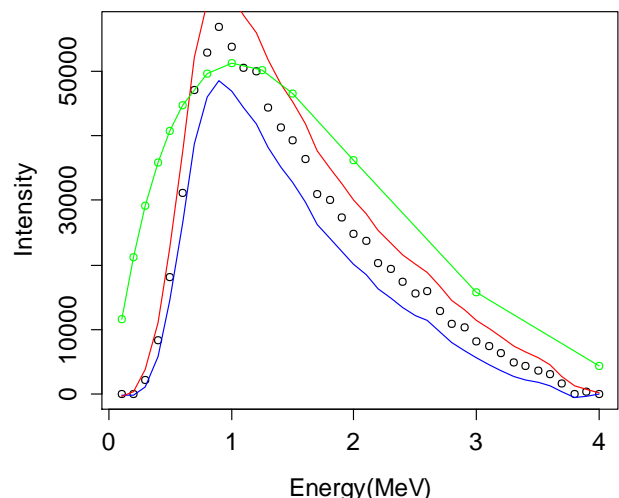
とモデル化する。ここで、以下の行列

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1(x_1) & \cdots & \phi_M(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1(x_N) & \cdots & \phi_M(x_N) \end{pmatrix}$$

は、モンテカルロシミュレーションから求める。

後は、事前分布を、他の論文のモンテカルロシミュレーションを平均値に持つガウス分布と仮定し、MAP 推定を行う。

線型モデルと MAP 推定を組み合わせたこの手法による解の決定は比較的頑健であり、治療計画機中のエネルギースペクトルとの比較でも矛盾のない結果が得られた。



図：X 線エネルギースペクトルの推定（黒丸）。上下の線は適当な仮定の下での標準偏差。

これらの研究成果を、アメリカ医学物理学会（AAPM）での口頭発表、プロシーディング、第 104 回日本医学物理学会学術大会および第 105 回日本医学物理学会学術大会での口頭発表、第 1 回ゲル線量計研究会での口頭発表、日本物理学会秋期年会のシンポジウムの講演として発表した。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

1. Jun'ichi Kotoku, Shinobu Kumagai,

Norikazu Arai, Naoya Saotom, Akihiro Haga and Takenori Kobayashi, Energy Spectrum Inference of X - Rays from a Linac, Medical Physics, 39, 2012, 3715-3715,  
<http://dx.doi.org/10.1118/1.4735112>  
査読有

2. Shinobu Kumagai, M. Okajima, H. Takaya, N. Arai, K. Waga, T. Tanaka, M. Yasuda, K. Takimoto, J. Kotoku and T Kobayashi, The improvement of discrepancy between radiotherapy treatment planning system and verification system using Effective Density Method, KEK Proceedings 2012-7, 1, 2012, 66-75  
査読無

3. J Kotoku, A Haga, S Saegusa, N Arai, T Kobayashi, K Waga, A Sakumi, S Itoh, S Kida, N Saotome, K Nakagawa, H Kanemitsu, and K Ishioka, Dose Calculation of KV Cone - Beam CT by Use of Pinnacle, Medical Physics, 38, 2011, 3723-3723,  
<http://dx.doi.org/10.1118/1.3613006>  
査読有

[学会発表] (計 6 件)

1. Jun'ichi Kotoku, Shinobu Kumagai, Norikazu Arai, Naoya, Akihiro Haga, Takenori Kobayashi, Energy Spectrum Inference of clinical photon beam by use of PDD, 55th AAPM Annual Meeting & Exhibition, 2013 年 08 月 05 日, Indianapolis, USA

2. 古徳純一、熊谷仁、新井範一、早乙女直也、芳賀昭弘、小林毅範、Energy Spectrum Inference of clinical photon beam by use of PDD、第 105 回日本医学物理学学会、2013 年 04 月 12 日、パシフィコ横浜

3. 古徳純一、X 線治療における物理学、日本物理学会第 68 回年次大会シンポジウム医学における物理学の貢献 (招待講演)、2013 年 3 月 28 日、広島大学

4. 古徳純一、熊谷仁、新井範一、早乙女直也、芳賀昭弘、小林毅範、3D ゲル線量計で推定する リニアックのエネルギースペクトル、第 1 回 3 次元(3D)ゲル線量計研究会、2012 年 12 月 02 日、広島

大学

5. 古徳純一、熊谷仁、新井範一、芳賀昭弘、小林毅範、リニアックの 頑健なエネルギースペクトル推定、第 104 回日本医学物理学学会、2012 年 09 月 15 日、パシフィコ横浜

6. 古徳純一、熊谷仁、新井範一、芳賀昭弘、小林毅範、リニアックのエネルギースペクトル推定、第 103 回日本医学物理学学会、2012 年 4 月 12 日、パシフィコ横浜

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://www.e-campus.gr.jp/staffinfo/public/staff/detail/1339/35>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古徳 純一 (KOTOKU JUNICHI)  
帝京大学・医療技術学部・講師  
研究者番号 : 70450195

(2) 研究分担者

( )  
研究者番号 :

(3) 連携研究者

小林 毅範 (KOBAYASHI TAKENORI)  
帝京大学・医療技術学部・教授  
研究者番号 : 10459365