

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：12301  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2017～2019  
課題番号：17K15798  
研究課題名（和文）コンプトンカメラを用いた体内Y-90の3次元イメージング

研究課題名（英文）Y-90 Bremsstrahlung Imaging using Compton Camera

## 研究代表者

酒井 真理 (Sakai, Makoto)

群馬大学・大学院医学系研究科・助教

研究者番号：70727338

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：人体ファントムを用いた測定を行った。また画像再構成の高速化を図り、画像再構成に要する短縮した。この過程でノイズの影響が再構成画像に大きく出てしまうようになったことから、ノイズ抑制フィルターを画像再構成アルゴリズムに加えた。新しく作成した画像再構成プログラムの性能をシミュレーションにより評価したところ、画像再構成にかかる時間を短縮しながらより高い画質の画像を得られることが確認された。これらを組み合わせることで、コンプトンカメラによりY-90の分布をイメージングすることができた。また測定性能を従来の機器と比較したところ、従来のシンチカメラ（SPECT）と同程度の分解能を得られることが確認された。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

コンプトンカメラは一般的に線源を測定するために用いられるが、線源をイメージングできる可能性が示された。本研究の結果はY-90の体内動態を直接測定できる可能性を示すもので、将来の医療費抑制に大いに役立つ。またコンプトンカメラの医療応用に向けた画像再構成手法の開発を行ったことにより、核医学応用だけでなく、粒子線の飛程測定など近距離のコンプトンイメージングの性能を向上させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：The measurement was performed using a human body phantom. A high-speed image reconstruction method was also developed to reduce the calculation time. In this process, the influence of noise has become large in the reconstructed image, so a noise suppression filter was added to the image reconstruction algorithm. When the performance of the newly created image reconstruction program was evaluated by simulation, it was confirmed that an image of higher quality could be obtained while shortening the time required for image reconstruction. By combining these, the distribution of Y-90 could be imaged by Compton camera. Besides, comparing the measurement performance with the conventional equipment, it was confirmed that the spatial resolution is similar to the conventional scintillation camera (SPECT) can be obtained.

研究分野：医学物理

キーワード：コンプトンカメラ Y-90の 制動X線 核医学 画像再構成

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

核医学では、診断だけでなく治療(内用療法)用にも RI が利用され、主に 核種が活用されている。入院不要で、侵襲も少ないことから、適用が広がっている。本邦でも近年、イットリウム-90(90Y)で標識されたゼヴァリンが悪性リンパ腫の治療薬として認可された。線は体内での飛程が短く、90Yの分布を体外から測定することは難しい。そこで 111In(核種)で標識した薬剤を事前投与することにより、集積や挙動を確認する必要がある。そのため治療開始が1週間遅れるだけでなく、患者や家族に不要な被曝(~40mSv)が生じる。直接的に90Y分布を測定できれば、この111Inの投与が不要になる。これまでに制動X線を用いたSPECT測定やPET測定が提案されているが、それぞれに課題を抱えている。体内で散乱された制動X線は発生位置情報を失いノイズとなるが、SPECTではこれを弁別できない。また制動X線のエネルギーが高いため、SPECTでは分解能を高められない。一方PETは導入コストが高いことに加え、90Yからの消滅線の発生確率が $10^{-8}$ 程度と低く、測定に長時間を要する。そこで申請者はSPECTより高エネルギー領域の放射線をイメージングできる「コンプトンカメラ」を応用できないか考えた。

コンプトンカメラはコンプトン散乱を用いることにより、物理的なコリメータを用いずに線の入射方向を円錐表面上に特定することができる。コリメータが不要となることから小型・軽量化が可能であると共に、高エネルギー線を測定することも可能となる。そのため、核医学分野への応用が期待されている。特にこれまでにエネルギーの問題等からSPECTに應用されてこなかった放射性同位体を用いた、新規の核医学検査についての研究が行われている。

### 2. 研究の目的

コンプトンカメラはコリメータを必要としない。そのため幅広いエネルギーを広視野・高感度、さらに複数核種を同時に可視化することができる。その特性から、次世代の核医学装置として期待され、本学でもJAXAや量研機構と共に開発を進めている。コンプトンカメラで制動X線を用いて90Yをイメージングする場合、SPECTと同様に体内で散乱されたX線(Scatteredevent)を弁別できない。また高エネルギーの制動X線ではイメージングに必要な光電吸収が起こらない割合が高く、その様な場合には正確に散乱角を算出できない(Escapedevent)。線イメージングの場合は、発生時のエネルギーが既知であることから、測定されるエネルギーを用いてこれらのノイズとなるイベントを弁別することが可能であるが、連続エネルギー分布を持つ制動X線では不可能である。そこで、ノイズイベント(ScatteredeventやEscapedevent)の発生する確率がX線のエネルギーに依存することに着目した。制動X線の挙動をシミュレーションにより解析し、ノイズイベントの混入率について検討した。その結果、特定のエネルギー範囲(200~400keV)の制動X線のみを用いることで、ノイズイベントの影響を最小限に抑え、コンプトンカメラによる90Yのイメージングが可能になることを実証した(特願2016-172263)。

本研究では実測によりコンプトンカメラでY-90をイメージングし、医療応用の可能性を検証した。

### 3. 研究の方法

イメージング性能を評価するため、点線源の測定を行った。既存の装置と比較するため、臨床で用いられているPET装置およびSPECT装置でも測定を行った。臨床応用の可能性を検討するため、人体ファントムを用いた3次元測定系を作成した。実験系は1軸ガイドレールと自動回転テーブルを用いたもので、FOV(コンプトンカメラ最前面の検出器から回転軸までの距離)が

250～450mm、回転軸の中心精度が～1mmである。人体ファントムを回転することで3次元的な測定を可能としている。人体ファントム内にY-90を注入し、濃度分布をコンプトンカメラで測定した。ファントム内には放射能の高いhot領域と、Y-90を封入しないcold領域を設けた。

画像再構成にはBP及びML-EMを用いてきたが、ML-EMでは計算時間が長くなることから、OS-EMを実装した。OS-EMでは、画像更新の速度が速くなるが、一方で過剰な繰り返し計算によるノイズ強調が起きやすくなる。そこで、MedianフィルタをOS-EMに組み込んだMRP-EMを実装した。MRP-EMの性能についてはシミュレーションによる楕円ファントムのイメージングによって性能を評価した。画質の評価には残渣平方和(residual sum of squares: RSS)、零平均正規化相互相関(zero means normalized cross correlation: ZNCC)、相互情報量(mutual information: MI)、濃度分布の強度比や均一性を評価した。

#### 4. 研究成果

実装したOS-EMではML-EMより高速な画像再構成を実現できることが確認された。ここにMedianフィルタを組み込んだMRP-EMでも計算速度はほぼ変わらなかった。MRP-EMではフィルタの効果によりML-EMやOS-EMで課題となる過剰な収束が生じず、ノイズの強調が見られなかった。そのため、繰り返し回数を増やすことにより、ML-EMやOS-EMよりも画質指標の高い画像を得ることができた。一方で2点分解能の低下が起こることから、目的とする画像に合わせたフィルタ強度をけんとうすることが求められる。

点線源のイメージング結果から点広がり関数を求め、空間分解能を評価した。同様にPET画像やSPECT画像で評価した点広がり関数を比較した。その結果、コンプトンカメラでの空間分解能はSPECTと同程度であることが確認された。

画像再構成にかかる時間を短縮しながらより高い画質の画像を得られることが確認された。これらを組み合わせることで、コンプトンカメラによりY-90の分布をイメージングすることができた。また測定性能を従来の機器と比較したところ、従来のシンチカメラ(SPECT)と同程度の分解能を得られることが確認された。

人体ファントムを用いた測定では、3次元的な放射能分布を可視化することに成功した。本結果は臨床応用の可能性を示す重要な結果である。しかし、cold領域の正確な可視化が難しいことが確認された。今後はよりcold領域を含め正確に放射能分布をイメージングするための手法を開発していく予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sakai Makoto, Yamaguchi Mitsutaka, Nagao Yuto, Kawachi Naoki, Kikuchi Mikiko, Torikai Kota, Kamiya Tomihiro, Takeda Shin'ichiro, Watanabe Shin, Takahashi Tadayuki, Arakawa Kazuo, Nakano Takashi	4. 巻 63
2. 論文標題 In vivo simultaneous imaging with 99mTc and 18F using a Compton camera	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 205006 ~ 205006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/aae1d1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakai Makoto, Parajuli Raj Kumar, Kikuchi Mikiko, Yamaguchi Mitsutaka, Nagao Yuto, Kawachi Naoki, Arakawa Kazuo, Nakano Takashi	4. 巻 56
2. 論文標題 Effect of number of views on cross-sectional Compton imaging: A fundamental study with backprojection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejmp.2018.11.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Parajuli Raj Kumar, Sakai Makoto, Kada Wataru, Torikai Kota, Kikuchi Mikiko, Arakawa Kazuo, Torikoshi Masami, Nakano Takashi	4. 巻 64
2. 論文標題 Annihilation gamma imaging for carbon ion beam range monitoring using Si/CdTe Compton camera	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 055003 ~ 055003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/ab00b2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakai Makoto, Parajuli Raj Kumar, Kubota Yoshiki, Kubo Nobuteru, Kikuchi Mikiko, Arakawa Kazuo, Nakano Takashi	4. 巻 15
2. 論文標題 Improved iterative reconstruction method for Compton imaging using median filter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0229366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229366">https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229366</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Three Dimensional Compton Imaging using C-shaped arm
2. 発表標題 Sakai Makoto, Raj PARAJULI, Kikuchi Mikiko, Arakawa Kazuo, Nakano Takashi
3. 学会等名 第117回医学物理学学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sakai Makoto, Raj PARAJULI, Kikuchi Mikiko, Arakawa Kazuo, Yamaguchi Mitsutaka, Nagao Yuto, Kawachi Naoki, Nakano Takashi, and Masami Torikoshi
2. 発表標題 Three-dimensional Y90 imaging with a commercial Compton camera
3. 学会等名 第115回医学物理学学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto Sakai, Raj Kumar Parajuli, and Wataru Kada
2. 発表標題 Yttrium-90 ( <sup>90</sup> Y-emitter) imaging using Compton camera
3. 学会等名 GUMI 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makoto Sakai, Raj Kumar Parajuli, Mikiko Kikuchi, Kazuo Arakawa, Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Naoki Kawachi, and Takashi Nakano
2. 発表標題 Impact of number of views on cross-sectional Compton imaging
3. 学会等名 JKMP 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Raj Kumar Parajuli, Makoto Sakai, Wataru Kada, Mikiko Kikuchi, Kazuo Arakawa
2. 発表標題 On-Beam Imaging of 718 keV Prompt Gamma using Si/CdTe Compton Camera for Carbon Ion Beam
3. 学会等名 IEEE NSS-MIC (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>医療用コンプトンカメラの開発  <a href="https://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/lab/2017research/compton.pdf">https://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/lab/2017research/compton.pdf</a>  医療用コンプトンカメラの開発  <a href="https://sites.google.com/a/gunma-u.ac.jp/ghmc-sakai/">https://sites.google.com/a/gunma-u.ac.jp/ghmc-sakai/</a></p>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考