

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82401
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22611018
 研究課題名（和文） 医療用ガンマ線イメージング装置高度化を目指したガンマ線レンズの基礎研究
 研究課題名（英文） Fundamental study of a gamma-ray lens for medical imaging applications
 研究代表者
 福地 知則 (FUKUCHI TOMONORI)
 独立行政法人理化学研究所・複数分子イメージング研究チーム・研究員
 研究者番号：40376546

研究成果の概要（和文）：

近年の結晶生成技術の進歩により普及してきたガンマ線用レンズについて、医療用ガンマ線イメージングへの有用性を検証した。ブラッグ回折型のレンズによりサブミリメートルの解像度を持つ装置を作製できる可能性がある事がシミュレーションにより分かった。しかし、この装置ではイメージングに数時間を要する。将来的に開発が見込まれるデリブリック回折によるレンズを用いると、イメージング時間を大幅に短縮することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：

We have been investigated usability of a γ -ray lens, which is spread owing to recent progress of crystal forming technology, for medical imaging. From a simulation result, sub-millimeter position resolution in γ -ray imaging is achievable using γ -ray lens based on Bragg diffraction. However, for the imaging system using this type of lens, we need a long imaging duration such as a few hours. A next-generation γ -ray lens based on Delbruck diffraction might realize a shortening of imaging duration.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	0	0	0
2009年度	0	0	0
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：時限 核医学

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：核医学、イメージング、ガンマ線、レンズ

1. 研究開始当初の背景

医療用イメージング装置と呼ばれる代表

的なものとして、光学顕微鏡、X線撮影(レントゲン)、ポジトロン断層法(PET)、X

線CT、などがある。これらはすべて疾患を画像化し診断、治療の情報を得るためのものである。中でもレントゲン、PET、X線CT等は透過力の高い電磁波を用いているため、対象の内部を非侵襲的に画像化することが可能である。したがって、昨今の早期発見、早期治療を目指した医療で広く用いられており、体のより内部の疾患を早期に発見するための強力な診断装置として位置付けられている。

しかしながら、これらの装置は、対象からの電磁波を直接測定するものであり、対象の等倍率の画像しか得ることができない。一方、蛍光顕微鏡を含む光学式の顕微鏡では、対象を拡大して、そのミクロな現象を画像化することが可能である。もし、体の内部を診断可能な、PET、X線CT等において、対象を拡大して画像化することが可能になれば、強力な診断ツールになることは明らかである。

光学顕微鏡では、光の屈折を利用したレンズにより、対象の拡大画像を得ている。一方で、PET、X線CTなどにおいて拡大画像を得ることが困難な理由は、波長の短い光であるX線やガンマ線は、光学レンズにより曲げることができないからである。しかしながら、X線、ガンマ線についても光学レンズとは異なる手法（ブラッグ回折）を用いることにより、曲げることが可能である。近年、特に宇宙観測用として、ガンマ線レンズが開発されて来ており、医療用ガンマ線イメージングへの応用も期待されている。

2. 研究の目的

近年の結晶生成技術の進歩により普及してきたガンマ線用レンズについて、医療用ガンマ線イメージング技術（スペクト、コンプトンカメラ等）への有用性を検証する。検証の過程では、ガンマ線レンズの光学的性能を

定量的に導き。この結果をもとに、既存のイメージングモダリティへの最適な応用方法を検討する。これにより、現在のイメージングモダリティでは不可能であった、対象の深部を拡大画像で動態解析することを可能とし、医療用ガンマ線イメージング技術に飛躍的進歩をもたらす。

3. 研究の方法

現在開発が進められているガンマ線レンズは、規則正しく並んだ結晶格子に、ある特定の角度でガンマ線が入射したとき、各格子での反射によるガンマ線光路差とガンマ線波長が一致した時にガンマ線強度が強くなる現象「ブラッグ回折」を利用したものである。このタイプのガンマ線レンズについて、幾何学的考察により、どの様に配置してイメージング装置と組み合わせて使用するのが有用であるかを考え、ガンマ線レンズを応用した医療用ガンマ線イメージング装置の具体的な構成例を検討する。さらに、レンズ性能のパラメータとしては文献値を用い、モンテカルロ・シミュレーションを行い、その装置の持ちうる性能を評価した。

4. 研究成果

レンズ素材としてゲルマニウムの単結晶を用いた場合、「ブラッグ回折」による511 keV ガンマ線に対する屈折角度は、0.4度程度である。レンズ素材を多数配置し凸型レンズと同様の光学系を構築する事により、一点から放出されるガンマ線を反対側の焦点で検出を行うとサブミリメートルの位置分解能を得られることがモンテカルロ・シミュレーションにより分かった。この方法で焦点位置を変えながら3Dスキャンを行うことで、原理的には、3Dのガンマ線プローブ分布画像を得ることができるが、1 MBqのRIに

対して、1 cm³ のスキヤンを行ったとして、有用な画像を得るためには数時間を要する。また、同様のレンズにより、ルーペと同じく虚像をつくり、数ミリ程度の位置分解能を持つガンマ線検出器により平面の拡大画像（R I 分布）を得る手法も考えられるが、この手法においても、長時間のイメージング時間を要する。どちらの手法においても検出効率が低い主たる原因は、「ブラッグ回折」によるレンズは、小さなブロッグ型の素材結晶を多数配置してレンズの効果を得ており、レンズ面の広さに対する、実際に屈折が起こる領域は、幾何学的解析から 20%程度と見積もられる。さらに、有効な位置に入ったガンマ線についても 1/5 程度しか回折を起こさないことによる。

この様なイメージング時間の長さから、実用的な装置を作るためには、何か大きなブレークスルーが必要だと考えられるが、研究期間中の 2012 年にマックス・プランク量子光学研究所が、くさび型のシリコン結晶に高エネルギーのガンマ線を照射すると、従来の物理学で予想される角度より、はるかに大きな角度でガンマ線が屈折すると報告した[2]。これは現在のところ、シリコン原子核内の電場によりバーチャルの電子-陽電子対が多数生成されており、この電子-陽電子対とガンマ線が相互作用することにより、大きな屈折が起こっている「デルブリュック回折」と呼ばれる現象ではないかと説明されている。実際の屈折角度は、184 keV のガンマ線に対して、30 nrad (約 2×10^{-6} 度) 程度であり、ブラッグ回折型のレンズと比較して、はるかに小さい。しかしながら、シリコンよりも重い金などの材料では、原子核内にさらに多数の電子-陽電子対が生成されており、大きな屈折角度をもたらすことが期待されている。このタイプのレンズでは、「ブラッグ回折」

によるレンズと異なり、一体成型のレンズを作製できるためレンズ面に対する有効面積を 100%にすることが可能である。したがって、この様なガンマ線レンズを使用すれば、「ブラッグ回折」によるレンズよりはるかに高い集光率を得る事が可能で、前述のスキヤニング法もしくは虚像法によりガンマ線プローブ分布の拡大画像を得る手法を実用的なイメージング時間で実行できる装置をつくる事が期待できる。

参考文献

[1] Development of a new photon diffraction imaging system for diagnostic nuclear medicine, D.E. Roa *et al.*, *Experimental Astronomy* 20, 229 (2005)

[2] Refraction Index of Silicon at γ Ray Energies, D. Habs *et al.*, *Physical Review Letters* 108, 184802 (2012)

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 2 件)

[1] Improved imaging performance of a semiconductor Compton camera GREI makes for a new methodology to integrate bio-metal analysis and molecular imaging technology in living organisms, S. Motomura, Y. Kanayama, M. Hiromura, T. Fukuchi, T. Ida, H. Haba, Y. Watanabe, S. Enomoto, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 28, p.934, (2013) (査読有り)

[2] A Digital Signal Processing Module for Ge Semiconductor Detectors,
T. Fukuchi, Y. Arai, F. Watanabe,
S. Motomura, S. Takeda,
Y. Kanayama, H. Haba, Y. Watanabe,
S. Enomoto
IEEE Transactions on Nuclear Science,
58(2), p.461, (2011) (査読有り)

[学会発表] (計 5 件)

[1] Positron Emission Tomography for Multiple Molecular Imaging
T. Fukuchi, T. Hanada, Y. Cui,
H. Toyoda, Y. Watanabe, S. Enomoto
World Molecular Imaging Congress 2012,
Dublin Ireland, September 5, 2012

[2] モンテカルロ・シミュレーターGATEによる PET 検出器応答の推定
福地知則, 豊田浩士, 渡辺恭良, 榎本秀一
第 6 回日本分子イメージング学会学術大会
浜松 2012 年 5 月 24 日

[3] Digital Pulse-Shape Analysis for Ge Compton Camera
T. Fukuchi, S. Motomura, S. Takeda, M. Hiromura, A. Fukunaka, H. Haba,
Y. Watanabe, S. Enomoto
2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference,
Valencia, Spain, October 25, 2011

[4] コンプトンカメラ / PET デュアルモダリティの利点
福地知則, 本村信治, 武田伸一郎,
羽場宏光, 渡辺恭良, 榎本秀一
第 6 回日本分子イメージング学会総会・学

術集会、神戸、2011 年 5 月 27 日

[5] 半導体検出器における多重相互作用信号の分解法
福地知則, 本村信治, 武田伸一郎,
金山洋介, 羽場宏光, 渡辺恭良, 榎本秀一
日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学、北九州 2010 年 9 月 11 日

[その他]
なし

6. 研究組織
(1) 研究代表者
福地 知則 (FUKUCHI TOMONORI)
独立行政法人理化学研究所・複数分子イメージング研究チーム・研究員
研究者番号：40376546

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし