

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K08036

研究課題名（和文）透明・軽量・フレキシブルな放射線検出器の開発と2次元リアルタイムイメージング

研究課題名（英文）Development of the transparent, lightweight and flexible radiation detector and real-time imaging of the two-dimensional dose distribution

研究代表者

石井 聡 (Ishii, Satoshi)

東京電機大学・理工学部・准教授

研究者番号：90442730

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）： 検出部にペンタセン薄膜，電極にはカーボンナノチューブ薄膜を用いることで，プラスチック基板の表面に透明でフレキシブルな3×3個のX線検出器の配列（検出器アレイ）を作製した．検出器アレイに対して実効エネルギーが83 keV，線量率が0～30.05 mGy/sのX線を照射しながら，各検出器で発生したX線電流を同時にリアルタイム測定することができた．さらに，理論と実験結果に基づいてX線電流を線量率に変換し，各検出器位置における線量率を2次元分布として可視化することで，本検出器アレイによる放射線イメージングを実証することができた．

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は透明でフレキシブルな放射線検出器を作製できたうえに，印加電圧が1 Vと低いにもかかわらず，0.78 mGy/sの低線量率までX線をリアルタイムで検出できた点にある．これは小型かつ省電力でのX線検出が可能であることを示しており，今後のウェアラブル検出器の開発に向けた足掛かりを得たことになる．また，本成果を発展させて放射線のリアルタイムイメージングを実現できれば，水晶体のリアルタイム線量率測定の普及により放射線診療従事者の安全が確保できる．さらに，患者の症状や人数に対して治療者の正確な積算被曝線量に基づいた最適な人員配置ができるため，その社会的意義は大きい．

研究成果の概要（英文）：The transparent and flexible array of 3×3 X-ray detectors was fabricated on the surface of a plastic substrate by using a pentacene thin film as the detector and a carbon nanotube thin film as the electrode. The X-ray current generated by each detector was simultaneously measured in real time while the detector array was irradiated with X-rays with an effective energy of 83 keV and a dose rate of 0 to 30.05 mGy/s. Based on the theoretical and experimental results, the X-ray current was converted into the dose rates, and the dose rate at the location of each detector was visualized as a two-dimensional distribution, demonstrating the radiation imaging capability of the present detector array.

研究分野：機能性デバイス

キーワード：放射線検出器 2次元イメージング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、X線診断や画像下治療(IVR)などの放射線を用いた医療が進歩している。一方で、放射線を扱う医療従事者において特に目の水晶体の被曝量が高いことが問題となっており、線量のリアルタイム測定による厳格な被曝量の管理が求められていた。これに対して、既存の検出器は眼球付近の線量を測定するには大型で不透明であることから、治療者の視野と作業の妨げとならない透明・軽量・フレキシブルな放射線検出器の開発が必要であった。当時、我々のグループでは透明なプラスチックフィルム的一种にX線を照射すると電流が発生し、X線を電気信号に直接変換できることを確認していた。そこで、プラスチックを検出部とし、電極には透明でフレキシブルなカーボンナノチューブ(CNT)を利用して透明・軽量・フレキシブルな放射線検出器を作製することによる、水晶体におけるリアルタイムでのイメージング(2次元線量分布の可視化)が期待された。

### 2. 研究の目的

プラスチックフィルムで透明・軽量・フレキシブルな検出器を開発し、2次元線量分布のリアルタイムイメージングを実証する。

- (1) プラスチックフィルムによる線量のリアルタイム測定方法の確立
- (2) イメージング用検出器とリアルタイムイメージングシステムの作製
- (3) 2次元線量分布リアルタイムイメージングの実証

### 3. 研究の方法

#### (1) プラスチックフィルムによるリアルタイム線量測定方法の確立

プラスチックフィルムとしてポリエチレンテレフタレート(PET)を使用した。コロナの影響によりX線照射施設の利用が制限されていたため、予備実験としてX線の代わりに紫外線(UV)照射実験を実施し、発生電流の温度変化を測定することで電極からPETに注入される電流を評価した。電極にはCNT薄膜電極に加えて比較のためにAu薄膜電極を使用した。

#### (2) イメージング用検出器とリアルタイムイメージングシステムの作製

当初、PETによるX線電流の検出を試みていたが電流が低過ぎたため、途中で検出部をPETと同様の有機材料であるTIPSペンタセンに変更した。そこで検出部にTIPSペンタセン薄膜、電極には当初の計画通りカーボンナノチューブ(CNT)薄膜電極を利用してX線検出器を作製した。図1に示したようにメタルマスクを利用してCNT分散液をPET基板表面にスプレーコートすることでCNT薄膜電極をパターンニングした。CNT薄膜電極間には、同様にメタルマスクを使用してTIPSペンタセン溶液を滴下し、バークすることでTIPSペンタセン薄膜をパターンニングした。さらに、このX線検出器を同一基板表面に3×3個配列させることで図2に示したようなイメージング用の検出器アレイを作製した。

検出器アレイ中の各検出器で発生したX線電流を順番に繰り返し測定するために、照射チャンパーに検出器アレイ設置用のホルダを製作するとともに、電源・測定器と各検出器を切り替えるためのスキャナなどを含む一連の測定系を構築した。さらに電圧印加や端子の切替タイミング及び電流測定とその記録に至る一連の動作について、コンピュータ制御による自動測定システムを構築した。

#### (3) 2次元線量分布リアルタイムイメージングの実証

X線照射実験は、量子科学技術研究開発機構の放射線医学研究所にてTAITAN-320型(管電圧:200 kV)を利用して実施した。Cu(0.5 mm)とAl(0.5 mm)のフィルターを使用することで、X線の実効エネルギーを83 keVに設定し照射した。照射チャンパー内に設置した検出器アレイに対してチャンパーの外側からX線を照射し、各検出器で発生したX線電流をリアルタイムで測定した。また、線源と検出器アレイの距離を調節することで線量率を0~30.05 mGy/sで変化させながら、X線電流の線量率依存性、検出器に印加する電圧に対する依存性、X線検出感度などの検出特性を評価した。さらに、X線電流の変化を線量率に変換す

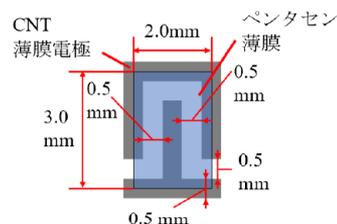


図1 X線検出器の概要。

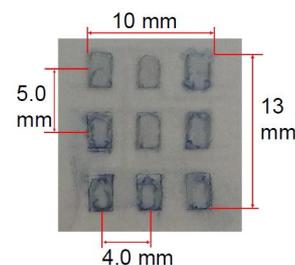


図2 X線検出器アレイ (3×3個の検出器)。

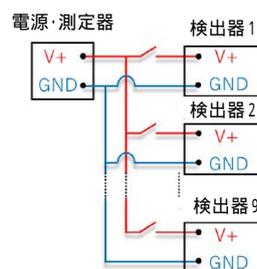


図3 測定回路。

る式を作成し、アレイ中の各検出器位置における線量率を2次元分布としてイメージプロットすることで可視化した。

#### 4. 研究成果

(1) 電圧を印加しない状態でUV(波長254 nm)を照射した場合のPETの電流-時間特性を図4(a)(b)に示した。CNT薄膜電極とAu薄膜電極の両方に対して、電圧を印加しない場合でもUV照射のみでホールが注入され電流が発生する様子が観測できた。また、電流の大きさ及び立ち上がりや減衰時間は温度で変化した。図4(c)に示したUV電流の最大値のアレニウスプロットを使用して電極-PET界面のエネルギー障壁を求めたところ、両電極ともに理論値よりも1.0 eV以上低かった。このことから、電極-PET界面の捕獲電子によりホールに対する障壁高さが低下し、PETに大量に注入されたホールが空間電荷を形成して電流を制限していることが分かった。

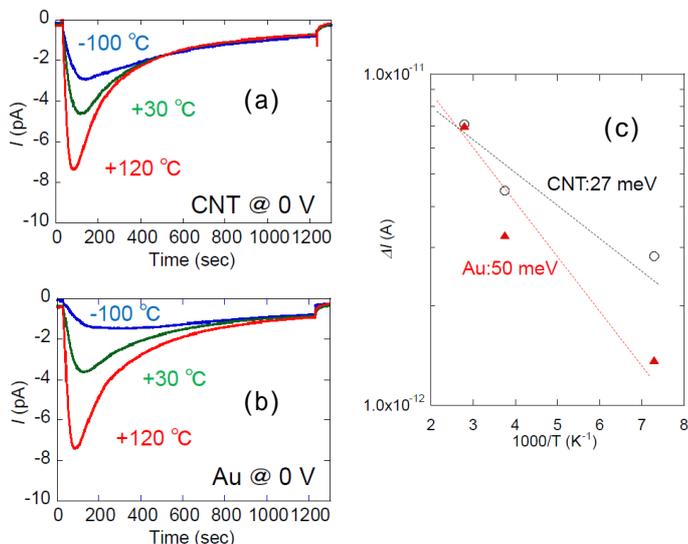


図4 (a) CNT薄膜電極及び(b) Au薄膜電極で測定したUV照射下(波長254 nm)のPETの電流-時間特性。(c) UV電流のアレニウスプロット。

(2) 図5に示すように、検出器アレイを構成する全9個の検出器について電流の時間変化を同時にリアルタイム測定することができた。また、各検出器の電流は線量率に依存して大きくなった。そこで、X線照射で増加した電流をX線電流( $\Delta I$ )とし、検出器への印加電圧に対してプロットしたものを図6に示した。このように各線量率において、X線電流は印加電圧に対して線形に増加することが分かった。

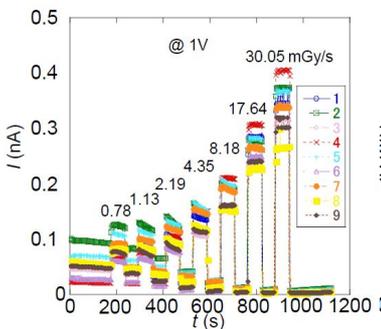


図5 アレイ中の各検出器におけるX線電流応答。

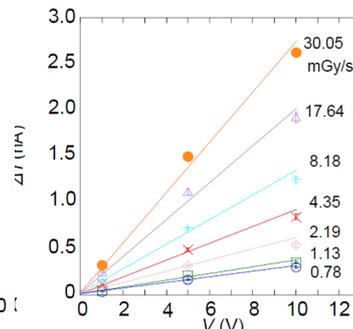


図6 X線電流の印加電圧依存性。

(3) 図7に各印加電圧について検出感度の線量率依存性を示した。検出感度は線量率の低い領域ほど高く、また、印加電圧を高くすると向上することが分かった。本研究では印加電圧が10Vのとき、0.78 mGy/sの照射に対して検出感度は最高値  $6.43 \mu\text{C}\cdot\text{Gy}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$  を示した。

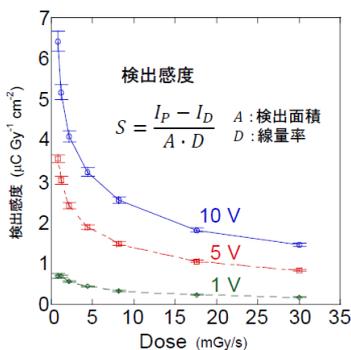


図7 検出感度の線量率依存性。

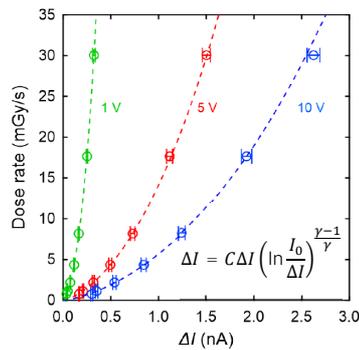


図8 線量率とX線電流の関係。

(4) X線電流を線量率に変換する式を作成するため、図8に示したように縦軸を線量率、横軸をX線電流の測定値にとったグラフを作成し、図中に示した理論式(引用文献)へのフィッティングを実施した。その結果、表1に示したように1,

表1 フィッティングで得られた線量率変換式のパラメータ。

印加電圧	C	$I_0$	$\gamma$
1	$2.34 \times 10^{11}$	$1.67 \times 10^{-9}$	0.351
5	$7.19 \times 10^{10}$	$1.11 \times 10^{-8}$	0.351
10V	$3.99 \times 10^{10}$	$1.76 \times 10^{-8}$	0.351

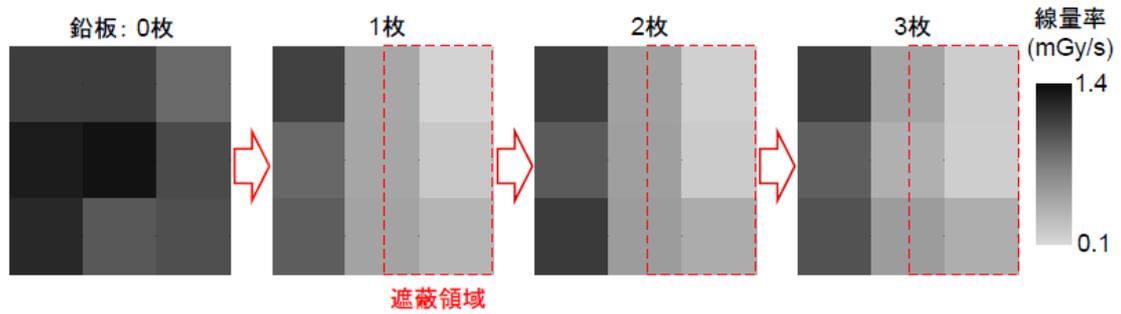


図9 検出器アレイにおける2次元線量分布のイメージプロット(1.13 mGy/s, 1 V)。

5, 10 Vの印加電圧に対して各パラメータが得られ、変換式を作成することができた。

(5) 検出器アレイの右側半分を鉛板で遮蔽し、電圧を1 V印加した状態で1.13 mGy/sのX線を照射した。図9は、測定したX線電流から換算式で求めた線量率をイメージプロットしたものである。鉛板が0枚(無遮蔽)の場合に対して、鉛板の枚数を増やしていくと遮蔽されている右側半分の領域で線量率が低くなる様子が観測された。このことから本研究で作製した検出器アレイを用いて、低電圧の印加で低線量率X線のイメージングを実証することができた。しかしながら、本研究で得られたのは静止画であり、当初の目標であるリアルタイムでのイメージングには至らなかった。理由として、X線電流のリアルタイム測定まではできたものの、リアルタイムで線量率に変換しイメージプロットする最終部分のプログラムの作成が遅れたことがあげられる。今後、プログラムを完成させることでリアルタイムイメージングシステムが実現できると思われる。

<引用文献>

Laura Basiricó *et al.* Nat. Commun. 7, 13063 (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川口寛仁, 須田充, 石川剛弘, 小西輝昭, 濱野毅, 石井聡
2. 発表標題 ペンタセン/CNT電極を用いた放射線検出器アレイの作製とX線測定
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村 太一, 鈴木 慧, 石川 剛弘, 小西 輝昭, 濱野 毅, 大野 雄高, 平尾 敏雄, 石井 聡
2. 発表標題 CNT薄膜電極を用いたUV照射に対するPET中の光電流の観測
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoru Suzuki, Taichi Nakamura, Takahiro Ishikawa, Teruaki Konishi, Tsuyoshi Hamano, Yutaka Ohno, Hiroshi Ajiki, Toshio Hirao, Satoshi Ishii
2. 発表標題 Observation of the UV-induced photocurrent in PET sheet using CNT thin-film electrodes
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 堅斗, 須田 充, 石川 剛弘, 大越 康晴, 小西 輝昭, 濱野 毅, 石井 聡
2. 発表標題 X線検出器配列における陽極のみの切換えによる測定時間の短縮
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鈴木 堅斗, 須田 充, 石川 剛弘, 大越 康晴, 小西 輝昭, 濱野 毅, 石井 聡
2. 発表標題 ペンタセン/CNT電極を用いた放射線検出器配列の作製とX線測定
3. 学会等名 日本MRS年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	足立 直也  (Adachi Naoya)  (30553515)	東京電機大学・理工学部・准教授   (32657)	
研究分担者	小西 輝昭  (Konishi Teruaki)  (70443067)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学研究所・上席研究員   (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------