

## 二種類の異なる半導体式サーベイセンサの基本特性比較

石井浩生<sup>1</sup>, 薩来 康<sup>1</sup>, 上杉直人<sup>2</sup>, 加藤 槿子<sup>2</sup>, 三戸麻莉菜<sup>3</sup>  
宮田恒平<sup>4</sup>, 芳賀喜裕<sup>1,5</sup>, 稲葉洋平<sup>1,6</sup>, 千田浩一<sup>1,6</sup>

<sup>1</sup>東北大学大学院医学系研究科 放射線検査学分野, <sup>2</sup>東北大学病院 診療技術部 放射線部門

<sup>3</sup>宮城県対がん協会 放射線課, <sup>4</sup>星総合病院 放射線科, <sup>5</sup>仙台厚生病院 放射線部

<sup>6</sup>東北大学災害科学国際研究所 災害医学研究部門 災害放射線医学分野

## Comparison of Fundamental Characteristics of Two Different Solid-state Survey Sensors

Hiroki ISHII<sup>1</sup>, Ko SATSURAI<sup>1</sup>, Naoto UESUGI<sup>2</sup>, Makiko KATO<sup>2</sup>, Marina SANNOHE<sup>3</sup>, Kohei MIYATA<sup>4</sup>,  
Yoshihiro HAGA<sup>1,5</sup>, Yohei INABA<sup>1,6</sup> and Koichi CHIDA<sup>1,6</sup>

<sup>1</sup>*Department of Radiological Examination and Technology, Tohoku University Graduate School of Medicine*

<sup>2</sup>*Department of Radiology, Tohoku University Hospital*

<sup>3</sup>*Department of Radiology, Miyagi Cancer Society*

<sup>4</sup>*Department of Radiology, Hoshi General Hospital*

<sup>5</sup>*Department of Radiology, Sendai Kousei Hospital*

<sup>6</sup>*Disaster Medical Radiology, Division of Disaster Medical Science,  
International Research Institute of Disaster Science,  
Tohoku University*

Key words : fluoroscopy, solid-state survey meter, scattered radiation, radiation safety

It is important to measure scattered radiation in diagnostic radiology in terms of evaluation of occupational exposure and leakage radiation dose. Unfors RaySafe (Sweden) released two types of solid-state survey sensors. However, there are no detailed reports regarding their characteristics. The purpose of this study was to investigate the fundamental characteristics of X2 survey sensor and Xi survey sensor, and their suitability for implementation to routine measurement of scattered radiation. This study focused on five characteristics : reproducibility, energy dependence, dose linearity, angular dependence, and temperature dependence. The results showed that X2 survey sensor has superior reproducibility to Xi survey sensor even at low dose rate. The other characteristics were almost comparable in X2 survey sensor and Xi survey sensor. In addition, X2 survey sensor is easier to handle and to analyze stored data than Xi survey sensor. The study concludes that X2 survey sensor is suitable for measurement of scattered radiation in diagnostic radiology.

### 1. 緒 言

診断用 X 線領域における職業被ばくや漏洩線

量の評価は重要である<sup>1-5)</sup>。その中で、空間散乱線の測定は適切な放射線防護を実施するために非常に重要である<sup>6-9)</sup>。散乱 X 線は広いエネルギー

範囲を持つため、測定にはエネルギー特性に優れる電離箱式サーベイメータがよく用いられる<sup>10-13)</sup>。しかし、電離箱式サーベイメータは空間散乱線測定に用いられる測定器の中で、最も感度が低いという短所がある。一方、熱ルミネセンス線量計 (Thermoluminescence dosimeter: TLD) や光刺激ルミネセンス線量計 (Optically stimulated luminescence dosimeter: OSLD) はエネルギー特性、感度ともに優れるが、値をリアルタイムに読み取ることができないため、積算線量測定に限定される<sup>13)</sup>。このように、線量率及び線量を正確に測定するためには、使用する測定器の測定範囲や再現性、エネルギー依存性を含む諸特性を十分に理解し、その上で精度管理をする必要がある<sup>14-17)</sup>。

今回、我々は診断 X 線領域で使用可能な 2 種類の異なる半導体式サーベイセンサを使用する機会を得た。一つは、X2 サーベイセンサ (Unfors RaySafe 社, Sweden) である。これは、放射線診断 QA 用 X 線測定器 RaySafe X2 (Unfors RaySafe 社, Sweden) をサーベイメータとして使用するためのセンサである。もう一つは、Xi サーベイセンサ (Unfors RaySafe 社, Sweden) である。これは、RaySafe X2 より先に発売された X 線測定器 RaySafe Xi (Unfors RaySafe 社, Sweden) をサーベイメータとして使用するためのセンサである。RaySafe X2 で使用する各種センサのうち、一般撮影用 R/F センサの基本特性に関しては、我々の先行研究として小林らが報告した<sup>18)</sup>。しかし、診断用 X 線領域で使用できる半導体式サーベイセンサは、発売から間もないこともあり、センサの種類毎の基本特性の違いは未だ明らかにされていない。

そこで本研究では、半導体式である X2 サーベイセンサと Xi サーベイセンサの 5 つの基本特性に関して、比較評価を行った。その上で、新型である X2 サーベイセンサの空間散乱線測定における有用性を検討した。

## 2. 方 法

### 2.1 使用機器

本研究で性能評価を行う半導体式サーベイセン

サは X2 サーベイセンサ (Unfors RaySafe) と Xi サーベイセンサ (Unfors RaySafe) である。どちらも、Si 半導体を用いており、空気カーマと 1 cm 周辺線量当量 (率) が測定できる。X2 サーベイセンサは RaySafe X2 (Unfors RaySafe) のベースユニットに、Xi サーベイセンサは RaySafe Xi (Unfors RaySafe) のベースユニットにそれぞれ接続して使用した。X 線発生装置については、後に示す評価項目のうち、再現性、エネルギー依存性、線量直線性の 3 項目に関しては診断用 X 線装置 DHF-115H II (日立メディコ) を用いた。方向依存性に関しては、X 線血管撮影装置 Infinix Celevel-i INFX-8000F (東芝メディカルシステムズ) を用いた。

### 2.2 再現性

同一条件で繰り返し測定したときの再現性を評価した。Fig. 1 は再現性の測定配置図を示している。X2 サーベイセンサ及び Xi サーベイセンサに対して一次 X 線を同時照射し、1 cm 周辺線量当量率を測定した。X 線管焦点-測定器間距離を 300 cm、照射野を縦 50 cm×横 55 cm、両測定器間距離を 16 cm とした。照射野内の X 線強度分布が均一で、両測定器が互いに散乱線の影響を及ぼさないことに関しては、予め確認済みである。また、実験室の壁からの散乱線の影響を減らすため、両測定器を壁から 1 m 以上離れた。透視条件は連続透視で管電圧を 40, 60, 80 kV、管電流を 0.1 mA とした。X 線出力を安定させるため、

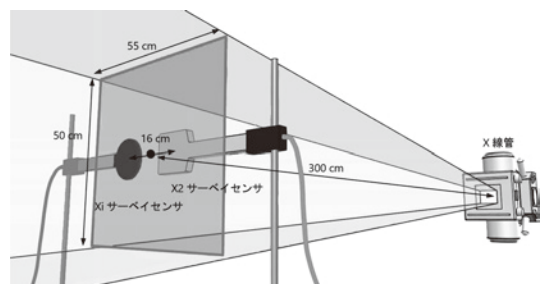


Fig. 1. 再現性の測定配置図

X2 サーベイセンサと Xi サーベイセンサに対して同時照射を行った。エネルギー依存性と線量直線性についても同様の配置とした。

透視開始から1分後の線量率を測定した。各管電圧で10回ずつ測定を行い、それぞれ変動係数を求めた。これを合計10回行い、再現性を評価した。

これに加え、より低い線量率における再現性も評価した。測定配置は先程と同様である。透視条件は連続透視で管電圧を50 kV、管電流を0.1 mAとした。線量率を下げるために、厚さ3 mmの銅板3枚をX線可動絞リ前面に取り付けた。X線出力を安定させるため、透視開始から1分後の線量率を測定した。各管電圧で10回ずつ測定してそれぞれ変動係数を求め、これを8回行って再現性を評価した。

### 2.3 エネルギー依存性

測定配置は再現性のときと同様である。透視条件は連続透視で管電流を0.1 mAとし、管電圧を40 kVから110 kVまで、10 kVずつ変化させた。X線出力を安定させるため、透視開始から1分後の線量率を測定した。各管電圧で5回ずつ測定し、それぞれ平均値を求めた。Xiサーベイセンサの測定値に対するX2サーベイセンサの測定値の比をとることで、エネルギー依存性を比較評価した。

### 2.4 線量直線性

測定配置は再現性のときと同様である。透視条件は管電圧45 kV、管電流0.1 mAの連続透視とした。線量率を下げるために、厚さ3 mmの銅板1枚をX線可動絞リ前面に取り付けた。X2サーベイセンサ、Xiサーベイセンサ共に積算線量(1 cm周辺線量当量)を連続で測定し、1秒ごとに値を記録した。測定は積算線量が10  $\mu$ Svに達するまで、およそ250秒間行った。これを合計3回行い、1秒ごとに積算線量の平均値を求めた。さらに、バックグラウンド測定を同じ時間で3回行い、先の積算線量値からバックグラウンドの値を差し引いた。各データに対し、Microsoft Office Excelを用いて最小二乗法による直線近似を行い、決定係数 $R^2$ を算出した。

### 2.5 方向依存性

Fig. 2は方向依存性の測定配置図を示している。血管撮影装置の寝台に発泡スチロールを設置し、その上に各サーベイセンサを設置した。初めに、

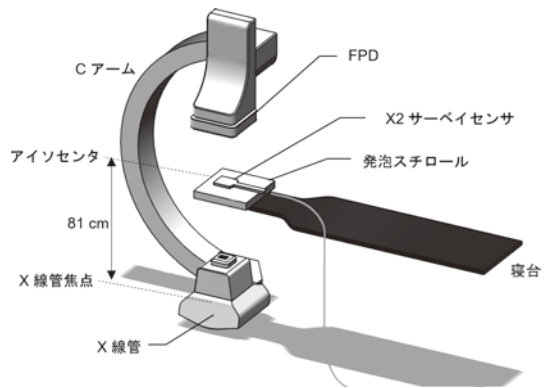


Fig. 2. 方向依存性の測定配置図

図は、垂直方向の方向依存性の測定配置を示している。Cアームを寝台の長軸回りに回転させて測定を行った。水平方向の方向依存性は、各サーベイセンサの向きを水平に90°変えることで測定した。

サーベイセンサの検出面を下向きに設置してCアームの角度を0°から90°まで10°ずつ変化させた。さらに、検出面を上向きに設置して0°、30°、60°と変化させることで、後面の感度を測定した。水平方向の方向依存性は、サーベイセンサをアイソセントラ軸と同じ向きに設置してCアームを回転させた。垂直方向の方向依存性は、サーベイセンサがアイソセントラ軸に対して水平に90°を向くように設置してCアームを回転させた。透視条件は管電圧50 kV、管電流1 mAの連続透視とした。X線出力を安定させるため、透視開始から1分後の線量率を測定した。

### 2.6 温度依存性

室温18°C、24°C、26°Cの部屋にX2サーベイセンサとXiサーベイセンサを置き、バックグラウンド積算線量(1 cm線量当量)を100秒間測定した。各温度で3回ずつ測定し、1秒ごとに平均値を求めた。

## 3. 結果

### 3.1 再現性

Fig. 3~Fig. 5は再現性の結果を示している。横軸は各測定回、縦軸は10回の繰り返し測定で得られた変動係数である。管電圧40 kV、60 kV、

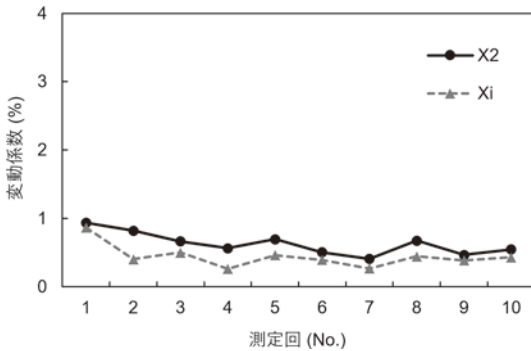


Fig. 3. 管電圧 40 kV における X2 サーベイセンサ及び Xi サーベイセンサの再現性  
変動係数の平均値は X2: 0.63%, Xi: 0.44% であった。

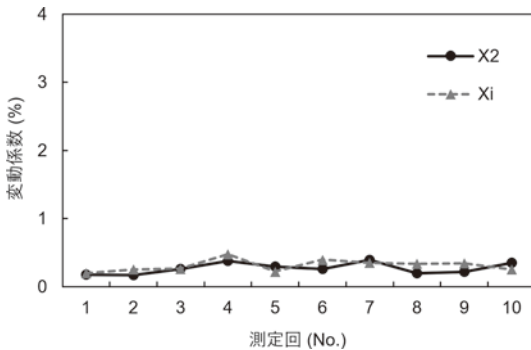


Fig. 4. 管電圧 60 kV における X2 サーベイセンサ及び Xi サーベイセンサの再現性  
変動係数の平均値は X2: 0.27%, Xi: 0.31% であった。

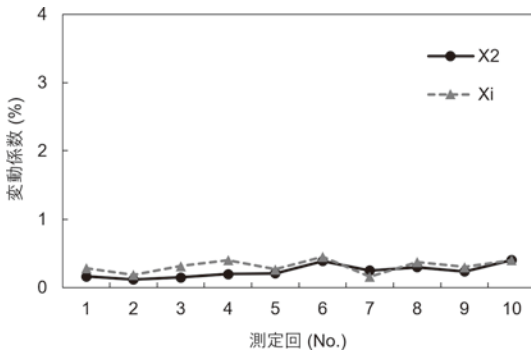


Fig. 5. 管電圧 60 kV における X2 サーベイセンサ及び Xi サーベイセンサの再現性  
変動係数の平均値は X2: 0.24%, Xi: 0.31% であった。

80 kV それぞれの変動係数の平均値は、40 kV のとき X2: 0.63%, Xi: 0.44%, 60 kV のとき X2: 0.27%, Xi: 0.31%, 80 kV のとき X2: 0.24%, Xi: 0.31% であった。Fig. 6 は低線量率における再現性の結果を示している。このとき、X2 サーベイセンサで測定した線量率の平均値は 25.8  $\mu$ Sv/h であった。それぞれの変動係数の平均値は、X2: 1.73%, Xi: 2.11% であった。

### 3.2 エネルギー依存性

Fig. 7 はエネルギー依存性の結果を示している。横軸は管電圧、縦軸は Xi サーベイセンサの測定

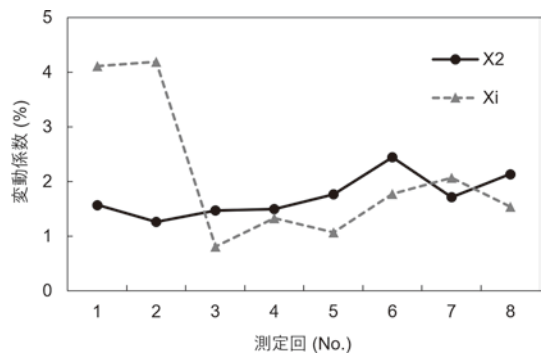


Fig. 6. 低線量率における X2 サーベイセンサ及び Xi サーベイセンサの再現性  
変動係数の平均値は X2: 1.73%, Xi: 2.11% であった。

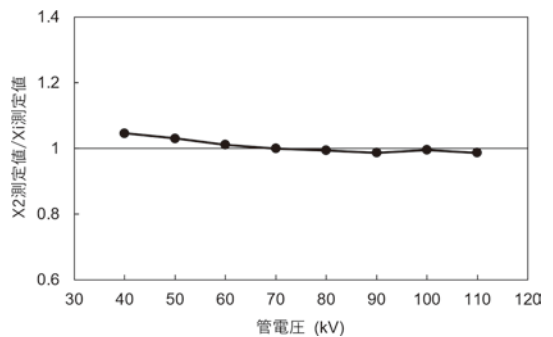


Fig. 7. X2 サーベイセンサと Xi サーベイセンサのエネルギー依存性比較  
縦軸は、Xi サーベイセンサで測定した線量率に対する X2 サーベイセンサで測定した線量率の比である。管電圧 70 kV の値で正規化した。

値に対する X2 サーベイセンサの測定値の比である。管電圧 70 kV のときの比を 1 とした相対値は、40 kV から 110 kV の間で 0.987~1.046 であった。

### 3.3 線量直線性

Fig. 8 は線量直線性の結果を示している。横軸が透視時間、縦軸が積算線量の両対数グラフである。X2 サーベイセンサ、Xi サーベイセンサ共に  $R^2$  値が 1 となり、線量直線性は同等であった。積算線量の測定範囲に関しては、両測定器共に、

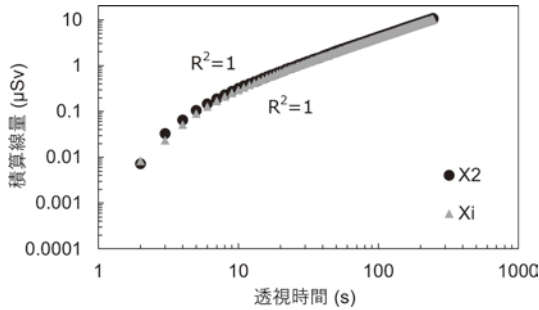


Fig. 8. X2 サーベイセンサと Xi サーベイセンサの線量直線性  
X2 サーベイセンサ、Xi サーベイセンサともに  $R^2=1$  であった。

0 nSv~9,999 Sv である。

### 3.4 方向依存性

方向依存性は、正面入射方向 ( $0^\circ$ ) を 1 とした相対感度で示した。Fig. 9 は水平方向の結果を示している。X2 サーベイセンサ、Xi サーベイセンサ共に  $0^\circ \pm 30^\circ$  において 90% 以上の感度を有し、 $0^\circ \pm 60^\circ$  では 70% 以上の感度を有していた。Fig. 10 は垂直方向の結果を示している。X2 サーベイセンサ、Xi サーベイセンサ共に  $0^\circ \pm 30^\circ$  において 95% 以上の感度を有していた。また、Fig. 9, 10 より、Xi サーベイセンサのみ検出器後方にやや感度を有しているが、最大でも前方の感度の 30% 程度である。

### 3.5 温度依存性

Fig. 11 は温度依存性の結果を示している。横軸は室温、縦軸はバックグラウンド積算線量である。X2 サーベイセンサは温度が上昇するにしたがってバックグラウンドの測定値が増加した。その割合は、 $24^\circ\text{C}$  のときを基準とすると、 $18^\circ\text{C}$  のとき  $-21.3\%$ 、 $26^\circ\text{C}$  のとき  $+24.0\%$  であった。また、X2 サーベイセンサの各温度における変動係数は、 $18^\circ\text{C}$  のとき 7.77%、 $24^\circ\text{C}$  のとき 0.00%、 $26^\circ\text{C}$  の

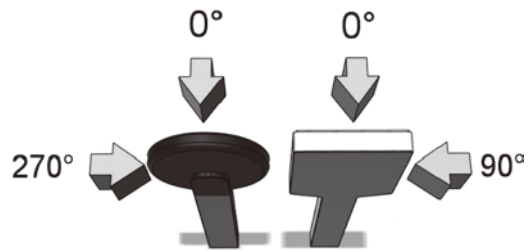
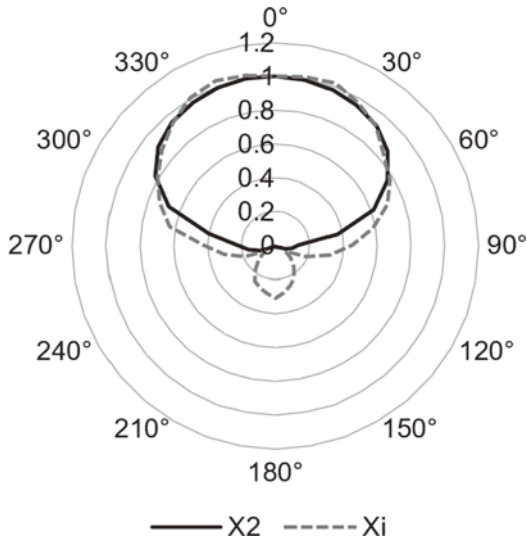
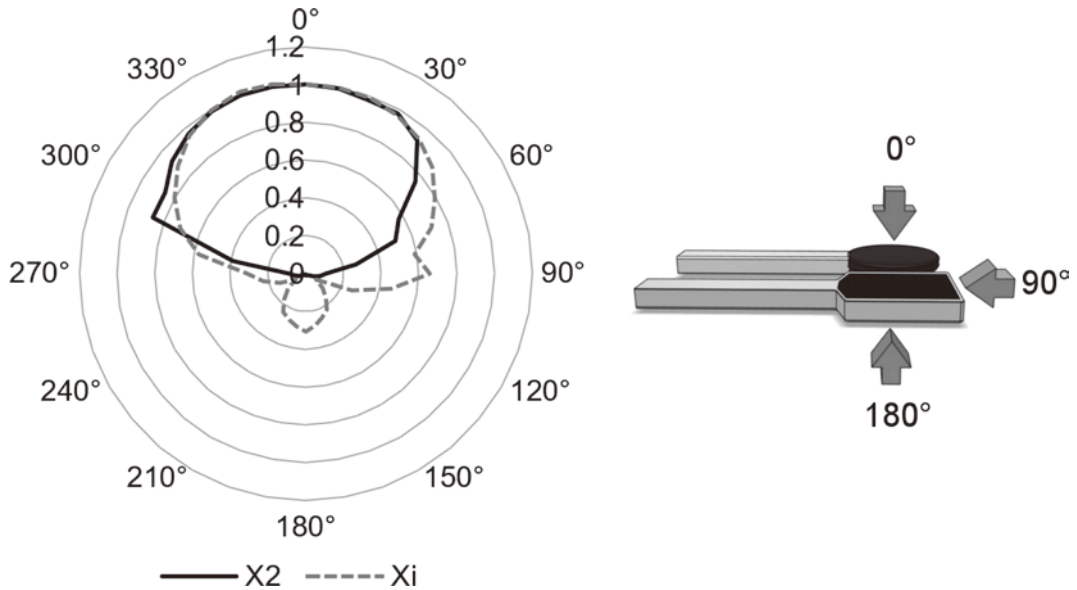
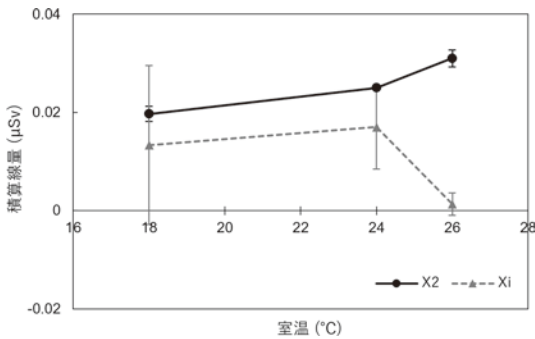


Fig. 9. X2 サーベイセンサと Xi サーベイセンサの方向依存性 (水平方向)  
正面入射方向を 1 とした相対感度で示している。X2 サーベイセンサ、Xi サーベイセンサともに  $0^\circ \pm 30^\circ$  で 95% 以上、 $0^\circ \pm 60^\circ$  で 75% 以上の感度を有していた。



**Fig. 10.** X2 サーベイセンサと Xi サーベイセンサの方向依存性（垂直方向）  
 正面入射方向を 1 とした相対感度で示している。X2 サーベイセンサ, Xi サーベイセンサともに  $0^\circ \pm 30^\circ$  で 95% 以上の感度を有していた。



**Fig. 11.** X2 サーベイセンサと Xi サーベイセンサの温度依存性  
 縦軸はバックグラウンドを 100 秒間測定したときの積算線量（1 cm 周辺線量当量）である。

とき 5.59% であった。一方、Xi サーベイセンサは各温度で 3 回測定した値のばらつきが大きくなり、測定値と温度との相関は見られなかった。Xi サーベイセンサの各温度における変動係数は、18°C のとき 121%、24°C のとき 50.3%、26°C のとき 173% であった。

#### 4. 考 察

空間散乱線量は、放射線業務従事者の職業被ばくや放射線施設の漏洩線量に関わる重要な項目であるため、正確に測定、管理しなければならない。X2 サーベイセンサ及び Xi サーベイセンサの基本特性に関しては、カタログデータ<sup>19-22)</sup> やトーレック社の中沢らによる報告<sup>23)</sup> において、線量及び線量率の測定範囲等が示されている。しかし、再現性やエネルギー依存性といった、国際電気標準会議 (IEC) 規格<sup>24)</sup> 及び日本工業規格 (JIS)<sup>25)</sup> にも採用されている主要な特性は明らかにされてこなかった。

再現性は X2 サーベイセンサ, Xi サーベイセンサ共に変動係数が 5% 以下となり、良好であった。ただし、低線量率では Xi サーベイセンサにおいてややばらつきが増大した。漏洩線量測定ではバックグラウンド付近の低線量率を測定しなければならないことがある。その点では、低線量率での再現性に優れる X2 サーベイセンサの方が有用と考えられる。

エネルギー依存性に関しては、管電圧 40 kV や 50 kV のときに X2 サーベイセンサの方がやや感度が高かった。しかしながら、その差は 40 kV から 110 kV の間で±5% 未満と、非常に小さいことが分かった。

線量直線性は両者同等であった。メーカー公称の線量範囲は両測定器共に 0 nSv～9,999 Sv である。広い線量範囲を有する点は半導体式サーベイメータの長所である。

方向依存性に関しては、 $0^\circ \pm 60^\circ$  においては X2 サーベイセンサ、Xi サーベイセンサ共に良好な感度を有していた。 $60^\circ$  より角度が広がるに従って急激に感度が低下した。RaySafe X2 ユーザマニュアル<sup>18)</sup> には、X2 サーベイセンサの検出器後方に若干の感度を有しているとの記載があるものの、本研究では後方の感度は見られなかった。一方、Xi サーベイセンサは後方に感度を有することが分かった。ただし、後方の感度は最大でも前方の 30% 程度であるため、後方散乱の測定に対しては信頼性が低いと考えられる。X2 サーベイセンサ及び Xi サーベイセンサに方向依存性が生じる原因は、検出器の幾何学的構造に起因するものと考えられる。なお、検出器の幾何学的構造はメーカーから公表されていない。このような方向依存性を有する半導体式サーベイセンサを使用する際は、検出面を散乱線発生源に向ける必要がある。

温度依存性に関しては、X2 サーベイセンサは温度が上昇するに従い、測定値がやや上昇した。これは測定器内部の熱雑音によるものと考えられる。一方、Xi サーベイセンサには温度と測定値の相関は見られず、測定値のばらつきが非常に大きくなった。原因は明らかではないが、オフセット調整により測定毎にゼロ点が変更されていた可能性がある。今回の実験では温度による変化を見るため、X2 サーベイセンサのオフセット調整は行っていない。低線量率かつ長時間の使用では、熱雑音の影響が相対的に増大する可能性があるため、適切にオフセット調整を行うことが必要と考えられる。また、バックグラウンド付近の低線量率における X2 サーベイセンサのばらつきが少な

いことが、この実験からも確認できた。

X2 サーベイセンサは Xi サーベイセンサに比べて、取り扱いやデータ解析が容易である。X2 サーベイセンサ及び Xi サーベイセンサで測定されたデータは、それぞれのベースユニットに自動的に保存される。さらに、そのデータを PC 用ソフトウェアに転送することで、より詳細な解析が可能になる。ただし、X2 サーベイセンサはベースユニット上で過去データを閲覧することができ、表示される情報量も多い。また、X2 ベースユニットの操作画面はタッチスクリーンである。さらに、Xi サーベイセンサは測定方式が手動トリガ方式であるのに対し、X2 サーベイセンサは手動トリガ方式と自動トリガ方式の 2 種類から選択できる。以上の点から、X2 サーベイセンサの方が利便性は高い。

前述の他に、X2 サーベイセンサは散乱線の平均エネルギーを測定できるという、他のサーベイメータにはない特長を有する。本研究では X2 サーベイセンサの平均エネルギー測定精度に関する評価は行っていないため、今後はこれに関する詳細な検討が必要である。

## 5. 結 論

診断用 X 線領域における、X2 サーベイセンサと Xi サーベイセンサの特性の比較評価を行った。X2 サーベイセンサは Xi サーベイセンサと比較して、低線量率の測定において優位であり、さらに取り扱いやデータ解析が容易である。ゆえに、X2 サーベイセンサは空間散乱線量測定を行う測定器として Xi サーベイセンサより有用であると考えられる。

## 謝 辞

実験に際し、ご協力いただいた仙台厚生病院放射線部の方々に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) Vano, E., Kleiman, N.J., Doran, A., Rehani, M.M., Echeverri, D., Cabrera, M.: Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel, *Radiat. Res.*, **174**,

- 490-495, 2010
- 2) Ciraj-Bjelac, O., Rehani, M.M., Sim, K.H., Liew, H.B., Vano, E., Kleiman, N.J.: Risk for radiation induced cataract for staff in interventional cardiology: is there reason for concern?, *Catheter. Cardiovasc. Interv.*, **76**, 826-834, 2010
  - 3) Chida, K., Morishima, Y., Inaba, Y., Taura, M., Ebata, A., Takeda, K., Shimura, H., Zuguchi, M.: Physician-received scatter radiation with angiography systems used for interventional radiology: comparison among many x-ray system, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **149**(4), 410-416, 2012
  - 4) Chida, K., Kaga, Y., Haga, Y., Kataoka, N., Kumasaka, E., Meguro, T., Zuguchi, M.: Occupational dose in interventional radiology procedures, *Am. J. Roentgenol.*, **200**(1), 134-141, 2013
  - 5) Haga, Y., Chida, K., Kaga, Y., Sota, M., Meguro, T., Zuguchi, M.: Occupational eye dose in interventional cardiology procedures, *Sci. Rep.*, **7**(1), 569, 2017
  - 6) Chida, K., Morishima, Y., Inaba, Y., Taura, M., Ebata, A., Takeda, K., Shimura, H., Zuguchi, M.: Physician-received scatter radiation with angiography systems used for interventional radiology: comparison among many X-ray systems, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **142**, 410-416, 2012
  - 7) Chida, K., Takahashi, T., Ito, D., Shimura, H., Takeda, K., Zuguchi, M.: Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures, *AJR. Am. J. Roentgenol.*, **197**, W900-903, 2011
  - 8) 稲葉洋平, 江端綾子, 田浦将明, 結城裕子, 竹川弥香, 梁川功, 田村元, 町田好男, 小倉隆英, 森一生, 本間経康, 石橋忠司, 齋藤春夫, 高井良尋, 佐藤行彦, 仲田栄子, 丸岡伸, 細貝良行, 千田浩一: 心血管 IVR 用 X 線装置の空間散乱 X 線量の装置間比較, *東北大学医学部保健学科紀要*, **18**, 45-51, 2009
  - 9) 本田崇文, 佐藤文貴, 石井浩生, 稲葉洋平, 常陸真, 立花茂, 梁川功, 千田浩一: IVR-CT 装置による CT 透視時の空間散乱線分布に関する基礎検討, *臨床放射線*, **62**, 1009-1104, 2017
  - 10) 日本放射線技術学会: 臨床放射線技術実験ハンドブック (下巻), 通商産業研究社, 東京, 1996, 478-482
  - 11) 田中仁, 山田勝彦, 安部真治, 小田紋弘: 新・医用放射線技術学実験 (基礎編), 第 3 版, 共立出版, 東京, 2016, 215-219
  - 12) 山田勝彦, 野原弘基: 診療放射線技術体系—専門技術学系 13 放射線計測学, 通商産業研究社, 東京, 1981, 305-308
  - 13) 日本画像医療システム工業会: X 線診療室の管理区域漏洩線量測定マニュアル, 日本画像医療システム工業会規格 (JESRA), 2016, 2-3, 15-16
  - 14) Chida, K., Nishimura, Y., Sato, Y., Endo, A., Sakamoto, M., Hoshi, C., Zuguchi, M.: Examination of the long-term stability of radiation survey meters and electronic pocket dosimeters, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **129**(4), 431-434, 2008
  - 15) Inaba, Y., Chida, K., Kobayashi, R., Kaga, Y., Zuguchi, M.: Fundamental study of a real-time occupational dosimetry system for interventional radiology staff, *J. Radiol. Prot.*, **34**, N65-N71, 2014
  - 16) 稲葉洋平, 千田浩一, 小林亮太: 冠動脈インターベンションにおける新型リアルタイム術者線量計システムの有用性, *心臓*, **47**(6), 679-686, 2015
  - 17) 佐藤文貴, 本田崇文, 芳賀喜裕, 稲葉洋平, 加賀勇治, 千田浩一: リアルタイム型 MOSFET 線量計の基本特性評価, *東北大学医学部保健学科紀要*, **26**(1), 57-65, 2017
  - 18) 小林亮太, 千田浩一, 稲葉洋平, 芳賀喜裕, 加賀勇治, 洞口正之: X 線出力測定器による診断用 X 線装置の線量測定に関する基礎検討, *東北大学医学部保健学科紀要*, **24**, 39-44, 2015
  - 19) Unfors RaySafe: RaySafe X2 User Manual, 54-61, 2016
  - 20) Unfors RaySafe: RaySafe X2 Classic Specifications, 6, 2016
  - 21) Unfors RaySafe: RaySafe Xi User Manual, 26-28, 2015
  - 22) Unfors RaySafe: RaySafe Xi Classic Specifications, 8, 2015
  - 23) 中沢洋, 松田安司, 五十嵐雅美: QC 用 X 線測定器 RaySafe X2 の特長と新機能, *JIRA テクニカルレポート通巻 49 号*, **25**, 20-21, 2015
  - 24) IEC 60846-1: 2009, Radiation protection instrumentation—Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation—Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors
  - 25) JIS Z 4333: 2014, X 線,  $\gamma$  線及び  $\beta$  線用線量当量(率)サーベイメータ