

## X線診断領域の線量測定における蛍光ガラス線量計の基本特性

村中 明<sup>1</sup>, 林 明子<sup>1</sup>, 天野 貴司<sup>1</sup>  
 荒尾 信一<sup>1</sup>, 成廣 直正<sup>2</sup>, 樋口真樹子<sup>2</sup>  
 西村 明久<sup>1</sup>, 今城 吉成<sup>1,2</sup>

### Characteristics Evaluation of Fluorescent Glass Dosimeter for Dose Measurement in X-ray Diagnosis

Akira MURANAKA<sup>1</sup>, Akiko HAYASHI<sup>1</sup>, Takashi AMANO<sup>1</sup>,  
 Shinichi ARAO<sup>1</sup>, Naomasa NARIHIRO<sup>2</sup>, Makiko HIGUCHI<sup>2</sup>,  
 Akihisa NISHIMURA<sup>1</sup> and Yoshinari IMAJO<sup>1,2</sup>

キーワード：蛍光ガラス線量計，X線診断領域，測定精度，エネルギー依存性，プレヒート

### 概 要

蛍光ガラス線量計をX線診断領域の線量測定に使用することを目的に，その基本特性について検討した。測定値はプレヒートを繰り返し行っても影響を受けず，線量を監視しながらの長期間の積算線量測定が可能であった。自由空間中でガラス素子を直接X線で照射した場合には，素子の線量読取り方向によって約5%の比較的大きな測定値の変動が認められ，ガラス素子内部の線量勾配と蛍光読取り機構のズレが測定値変動の要因の一つと考えられた。繰り返し読取り誤差，読取り方向による誤差，素子の感度バラツキを含んだ測定値の変動は，10mGy程度の線量では変動係数3%以下と良好であった。診断用X線のエネルギー範囲ではガラス素子の感度の変化は小さく，エネルギー補償フィルタ無の素子でも線量評価が可能であった。これらの結果から，蛍光ガラス線量計は患者被ばく線量や外部放射線量の測定評価に大変有用であると考えられた。

### 1. 緒 言

近年，改良された蛍光ガラス線量計はガラスバッジとして個人被ばく管理に広く使用されている<sup>1)</sup>。これを超小型化し各施設で測定可能にした蛍光ガラス線量計・小型素子システム<sup>2,3)</sup>が，従来から広く使用されてきた熱ルミネセンス線量計 (thermoluminescence dosimeter : 以下 TLD) に代わりうる小型の線量計として注目を浴びている。この蛍光ガラス線量計は銀活性リン酸塩ガラスを素子として用い，放射線を照射すると安定な蛍光中心が形成される。この蛍光中心を約320nmのパルス状紫外線で刺激するとラジオフォトル

ミネセンス (radiophotoluminescence : 以下 RPL) が発生し，それを光電子増倍管で測定する。RPL量はガラス素子の吸収線量に比例していることから，線量測定に用いることができる。旧ガラス線量計に比して，ガラス組成の改良や窒素ガスレーザーのパルス状紫外線を用いた蛍光読取り技術の改良により，ガラス洗浄が不要で低線量まで測定が可能になる等，格段に性能が向上したといわれている<sup>1)</sup>。

蛍光ガラス線量計は TLD と比較し，読取りによる RPL 量の減少がなく繰り返し読取り可能であること，素子の均一性により感度のバラツキが小さいこと，フェーディングがほとんどない等の長所がある<sup>4)</sup>。また，TLDと同様に線量計が小型で測定線量範囲が広く，低エネルギーから高エネルギー光子に渡って測定ができることから，放射線治療における線量分布の測定やX線診断領域の皮膚表面線量の評価に利用されている<sup>5~8)</sup>。

今回，我々の施設においても蛍光ガラス線量計を診

(平成19年10月10日受理)

<sup>1)</sup>川崎医療短期大学 放射線技術科，<sup>2)</sup>川崎医科大学附属病院 中央放射線部

<sup>1)</sup>Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

<sup>2)</sup>Department of Radiological Technology, Kawasaki Medical School Hospital

断領域のX線による患者被ばく線量や外部放射線量測定に使用することを目指して、その基本特性として、プレヒートの影響、測定値のバラツキの程度やエネルギー依存性等について検討したので報告する。

## 2. 研究方法

使用した蛍光ガラス線量計・小型素子システムはDose Ace (FDG-1000シリーズ, 千代田テクノル社製)で、線量計リーダ、ガラス素子・ホルダ、読取りマガジン、アニール用電気炉、プレヒート用恒温器から構成されている。図1に実験に使用したガラス素子・ホルダおよび読取りマガジンを示す。ガラス素子・ホルダは、IDナンバーが刻印されたガラス素子(直径1.5mm, 長さ12mm)を診断領域X線のエネルギー依存性を補償するフィルタ(Sn フィルタ)を内蔵したホルダに入れたGD-352M素子20個と、同様のガラス素子を補償フィルタが無いホルダに入れたGD-302M素子20個の2種類を用いた。

図2に蛍光ガラス線量計における測定手順を示す。はじめに、ガラス素子に傷や汚れがないか目視によりチェックを行った。その後、電気炉を用いて400℃で20分間熱処理(アニール)を行いガラス素子に蓄積された線量を消去し、ガラス素子が室温まで冷えた後、残存している蛍光成分である初期値(プレドーズ)を測

定した。今回使用したガラス素子のプレドーズは20~70 $\mu$ Gyであった。次に、放射線照射を行った。照射後、RPL量は時間の経過とともに増加して安定するというビルドアップ特性があるので、このビルドアップを短時間に完了させるためにプレヒート(70℃で30分間)を行った。ガラス素子が室温まで冷えた後、ガラス素子読取り位置20箇所を有する読取りマガジンを使用し、線量計リーダでRPL値を測定した。したがって、アニールから測定結果が得られるまでおよそ2日間の時間を要した。

X線の照射は、東芝製のX線発生装置(KXO-1000, L2)およびX線管(DRX-290HD)を使用した。発生したX線の実効エネルギーの測定はアルミニウム吸収板減弱法にて行った。また、リファレンス線量計としてRAMTEC1500B型診断用線量計およびDC-300型3cc指頭型チェンバ(東洋メディック社製)を用いた。この線量計は校正認定事業者によって校正済みのものである。

図3にX線照射と線量計配置図を示す。X線の照射は撮影条件(管電圧は40~120kV)で行い、X線管焦点-線量計間距離を1m, 照射野は30cm $\times$ 30cmとし、線量はリファレンス線量計の値で約10mGy(空気吸収線量)を基準とした。ガラス素子に対して照射するX線量を一定にするために、ガラス素子4個を一組として、発泡スチロール上にX線管軸方向と直交する方向に1cm間隔で配置し、リファレンス線量計と同時に照射した。X線管の出力の変動は、リファレンス線量計の値を用いて補正した。

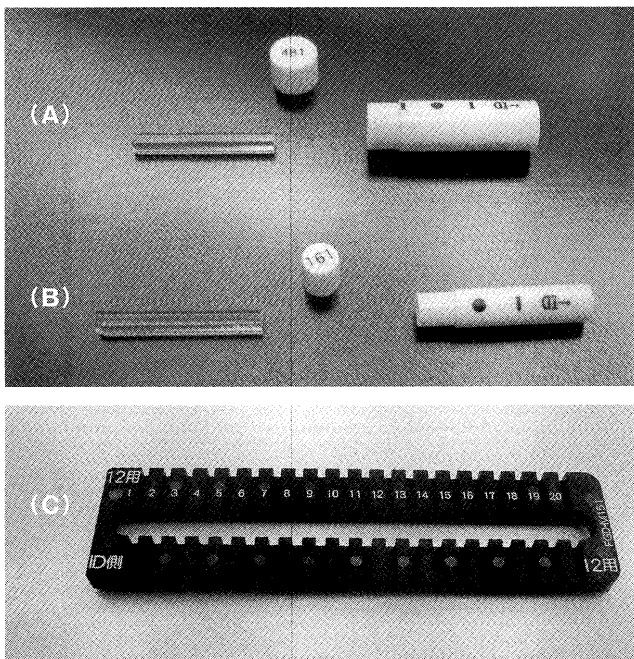


図1 ガラス素子・ホルダと読取りマガジン

(A) GD-352M フィルタ有, (B) GD-302M フィルタ無, (C) 読取りマガジン

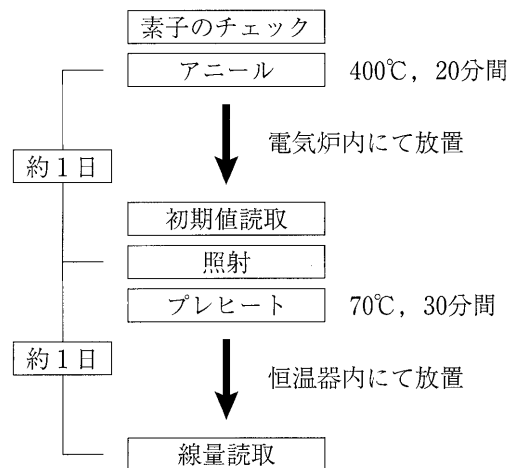


図2 測定手順

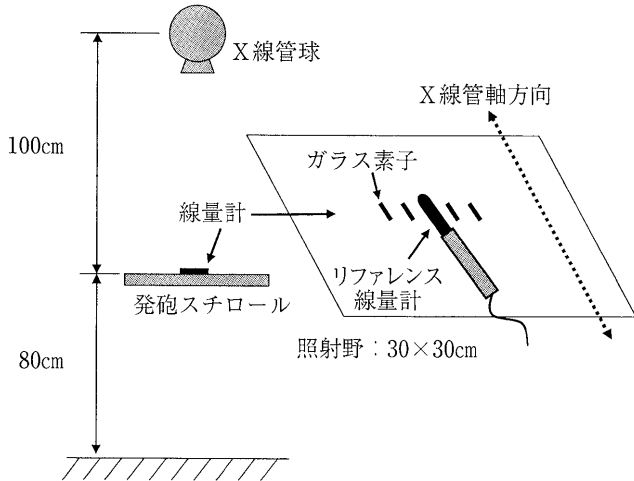


図3 X線照射と線量計配置図

### 3. 結果

#### (1) プレヒートの影響

図4に GD-302M 素子を用いてプレヒートの影響を経時的に検討した結果を示す。管電圧80kVで照射した後、プレヒート有と無の2グループに分け1時間から144時間まで繰り返し測定し比較した。プレヒートは照射1.5時間後に行った。プレヒートを行わない素子

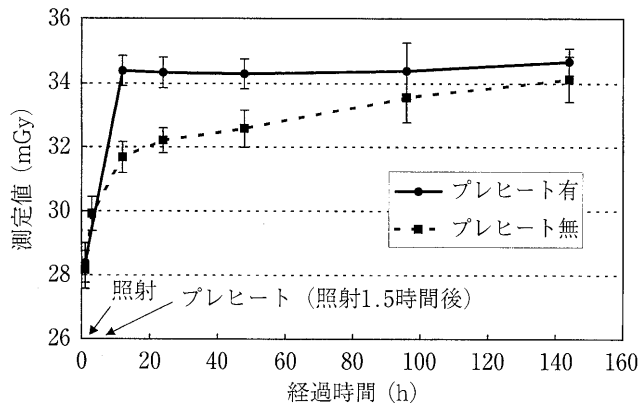


図4 測定値に及ぼすプレヒートの影響

表1 積算線量に及ぼすプレヒート・線量読取りの影響

	第1回目照射	第2回目照射	第3回目照射
(A) プレヒート	有	有	有
測定値 (mGy)			
平均	11.36	22.63	32.48
標準偏差	0.15	0.27	0.44
(B) プレヒート	無	無	有
測定値 (mGy)			
平均	—	—	32.79
標準偏差	—	—	1.18

は、照射後144時間（6日）後まで測定値が増加し続け、長期間ビルドアップ現象が認められた。プレヒートを行った素子では、プレヒート前（照射後1時間）に対してプレヒート終了後（照射後12時間）の測定値は約20%増加し、その後は安定した値を示した。以後の実験では、プレヒートは照射約1.5時間後に行い、測定値の読取りはその約20時間後に行った。

線量を読取りながら長期間の積算線量を求めることを念頭に、照射とプレヒート・線量読取りを繰り返した場合の積算線量に及ぼす影響を検討した結果を表1に示す。GD-352M 素子を8本ずつ2グループに分け、約24時間間隔で3回照射した。(A)グループは照射ごとにプレヒート・線量読取りを行い、(B)グループは3回目の照射終了時のみプレヒート・線量読取りを行った。両者の最終的な測定値を比較したが、ほとんど差が認められず途中のプレヒート・線量読取りの影響はなかった。

#### (2) 測定値の変動

図5に管電圧80kVで照射した GD-302M の同一素子を用いて、読取りマガジン位置による測定値の変動を検討した結果を示す。読取りマガジンは同時に20個まで素子を設定することが可能であるが、素子を同一条件で10個以上照射することがほとんどないことから、今回は1~10の読取り位置を使用した。(A)は素子の読取り方向を固定せずにランダムに測定した場合で、平均値に対して+2.6~-3.1%の変動を示した。

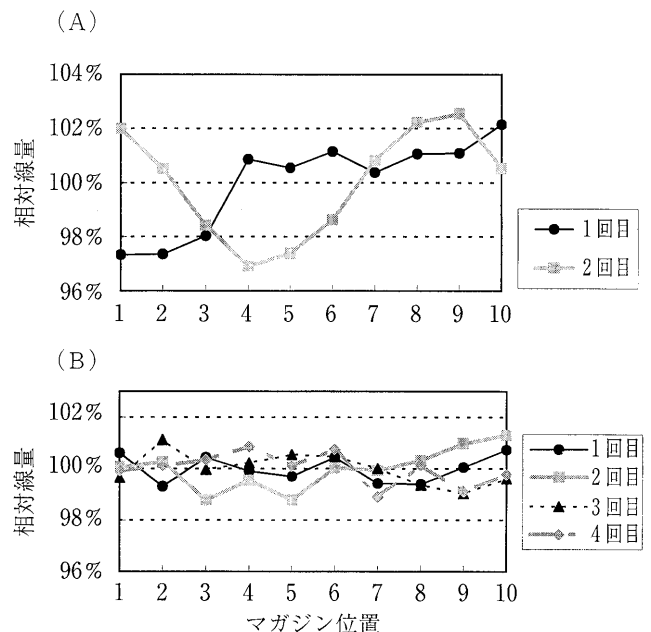


図5 読取りマガジン位置による測定値の変動

(A) 読取り方向：ランダム、(B) 読取り方向：固定

(B)は読取り方向を固定 (ID 番号を上) して測定した場合で、+1.3~-1.2%の変動幅に減少し、明らかに素子の読取り方向によって測定値が変動することが分かった。読取りマガジンの位置によって一定の変動傾向はなく、この変動幅は繰り返し測定誤差の範囲を示すものと考えられた。

図6にGD-302M素子を用い、X線照射方向と素子読取り方向による測定値の変動を検討した結果を示す。管電圧60~100kVの条件で、合計12本の素子をホルダに入れずにID番号側から直接X線を照射した。その後、ID番号を上と下にして読取った値を比較した。ID番号を下にして読取ると、上の場合よりもすべての素子で測定値が増加し、平均で約5% (2.0~7.1%) 増加した。

表2に測定値の変動について検討した結果のまとめを示す。同一素子を用いた繰り返し測定の変動係数は、マガジン位置も読取り方向も固定した場合は0.4%以

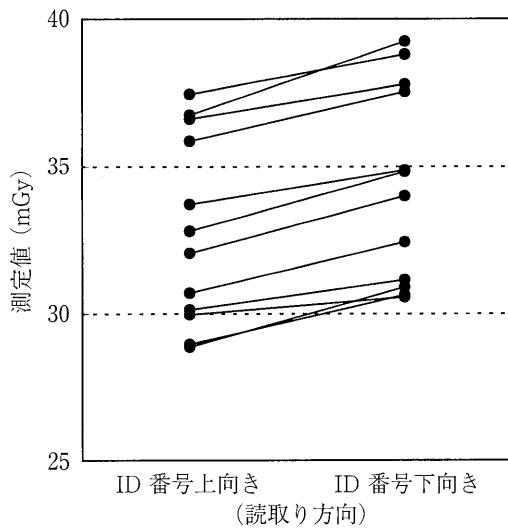


図6 ガラス素子読取り方向による測定値の変動  
X線照射方向：ID番号側から照射

表2 測定値の変動のまとめ

条 件	変動係数
繰り返し測定誤差	
(GD-302M, 同一素子, 管電圧: 80kV, 約10mGy 照射)	
マガジン位置固定, 読取り方向固定	0.4%以下
マガジン位置1~10, 読取り方向固定	0.8%以下
マガジン位置1~10, 読取り方向ランダム	2.2%以下
素子感度のバラツキ (管電圧: 80kV, 約10mGy 照射)	
マガジン位置1~4, 読取り方向ランダム	
GD-352M 20個	8.21±0.23(mGy) 2.8%
GD-302M 20個	28.51±0.76(mGy) 2.7%

下, マガジン位置1~10で読取り方向固定の場合は0.8%以下, マガジン位置1~10で読取り方向ランダムの場合は2.2%以下となり, 読取り方向による変動が大きかった。素子の感度のバラツキを検討した結果, 管電圧80kVで10mGyの照射では, GD-352M素子20個の変動係数は2.8%, GD-302M素子20個の変動係数は2.7%であった。

(3) エネルギー依存性

図7に管電圧40~120kV (実効エネルギー26~39keV)におけるGD-352M素子 (フィルタ有) とGD-302M素子 (フィルタ無) のエネルギー依存性を検討した結果を示す。縦軸はリファレンス線量計で測定した基準線量を1.0とした場合の相対線量を表している。エネルギー補償フィルタ無のGD-302M素子では, 基準線量の約2.8倍の測定値を示したのに対し, フィルタ有のGD-352M素子では約0.8となり, 感度が補正されていることが確認できた。しかし, 検討したエネルギー範囲では, 両素子ともX線エネルギーの変化による感度の変化は小さく, 基準線量へ換算するための校正定数はGD-352M素子で平均1.250 (+5.3%~-3.8%), GD-302M素子で平均0.355 (+1.4%~-2.3%) であった。

4. 考 察

蛍光ガラス線量計は優れた特性を持っているが, ビルドアップ特性のためにプレヒートを行う必要がある。放射線照射から線量読取りまでに時間がかかるのが欠点である。しかし, 比較的長期間の積算線量評価が必要な外部放射線量の測定では, この欠点が問題点となることが少なく, フェーディングがほとんどなく耐候性に優れているという蛍光ガラス線量計の長所<sup>4)</sup>を生かすことができる。すでに, 環境放射線の測定に

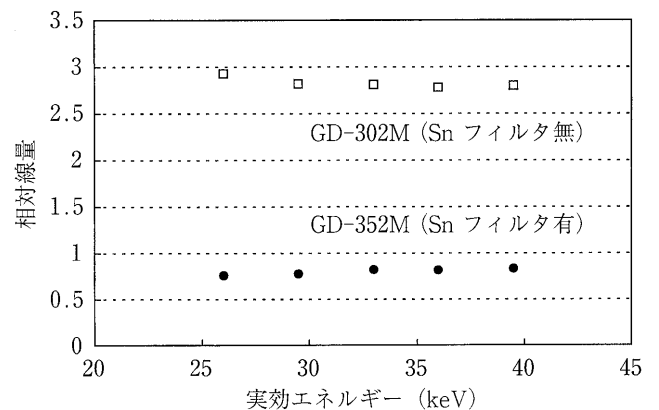


図7 ガラス素子のエネルギー依存性

蛍光ガラス線量計を使用するサービスも行われているが<sup>9)</sup>、実験に使用した蛍光ガラス線量計・小型素子システムは、小型で使いやすく各施設で手軽に実測することが可能である。今回のプレヒートの影響を検討した結果から、プレヒート・線量読取りを繰り返しても積算線量には影響を与えず、途中の線量を監視しながら長期間の積算線量測定が可能なが示された。医療施設の外部放射線量は放射線発生装置や放射性同位元素使用時と非使用時ではまったく異なり、ある時間の線量率を測定して長期間の積算線量に換算する方法では大きな誤差を生じる危険がある。このシステムを利用すれば、使用施設内や管理区域境界等の外部放射線量を1週間から3ヶ月間の積算線量として実測することが可能であり、より正確な放射線管理に有用であると考えられる。

蛍光ガラス線量計はガラス組成の均一性から素子間のバラツキが小さく、1 mSv 以上での感度のバラツキは変動係数で2%以下といわれている<sup>1)</sup>。実験に使用したガラス素子の出荷時における感度バラツキに関する検査成績書では、<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 線の1 mGyの照射に対してGD-352M素子で変動係数1.08%、GD-302M素子で1.29%である。

同一素子を用いた同一条件における線量計リーダによる繰り返し読取り誤差は変動係数で0.4%以下と小さかったが、今回の実験では明らかにX線の照射方向と素子読取り方向によって測定値の変化が認められた。Dose AceのRPL読取り機構は、直径1.5mmのガラス素子に直径1.0mmの窒素ガスレーザーを入射させ、RPL発光を光電子増倍管で計測している<sup>8)</sup>。高エネルギーX線や $\gamma$ 線によってガラス素子を照射した場合、素子内部に軽度の線量勾配が存在し、0.1mmの読取り機構の幾何学的なずれによって1%程度測定値が変動する可能性があるという報告<sup>10)</sup>があり、診断用の低エネルギーX線を使用し散乱線を含まない自由空間中で照射した今回の実験条件では、よりガラス素子内部の線量勾配が大きくなる可能性が高い。したがって、ガラス素子内部の蛍光中心形成がX線入射方向に対して不均一になり、RPL読取り機構のズレによって測定値に約5%という比較的大きな変動が生じたと推測される。低エネルギー光子の測定においては、このことが測定値変動の要因の一つと考えられ、厳密な測定においては注意が必要である。

通常ガラス素子を線量測定に使用する場合には、素子をホルダの中に入れて照射するためにX線照射方向

を特定することが困難で、読取り方向による測定値の変動を防ぐことは難しい。また、散乱線を含む通常の測定では、ガラス素子に対するX線入射方向も広がり内部の線量勾配も小さくなると推定され、読取り方向による測定値の変動も減少すると考えられる。繰り返し読取り誤差、読取り方向による誤差、素子の感度バラツキを含んだ測定値の全体的な変動は、変動係数で3%以下と良好であり、他者の検討結果<sup>7)</sup>とほぼ一致した。

ガラス素子は、銀イオンを含み実効原子番号が高いため、エネルギー依存性が大きい。ガラス素子および線量計リーダは<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 線(662keV)を自由空間中で照射した場合について校正されているが、診断用のX線の低エネルギー領域では感度が高く、真の線量に対して数倍の測定値を示す<sup>11)</sup>。そのためエネルギー補償フィルタ付きのホルダを利用して測定値を真の線量に近づけている。今回検討した管電圧40~120kV(実効エネルギー26~39keV)では、フィルタ有のGD-352M素子に対してフィルタ無のGD-302M素子の測定値は約3.5倍であった。しかし、このエネルギー範囲では両素子とも感度の変化は少なく、真の線量へ換算するための校正定数を求めておけば、フィルタ無の素子でも線量評価に使用できる。

今回の検討では、X線の照射は自由空間中で行ったために散乱線の寄与が含まれていない。実際に患者皮膚線量を測定するためには、患者測定部位と同等なファントムの上で照射し校正定数を求める必要がある。ファントム実験等の場合はどちらの素子も使用することができるが、臨床時に患者皮膚表面に直接貼付して測定する場合は、フィルタ有の素子は撮影や透視時に障害陰影になるため、フィルタ無の素子を使わなければならないと指摘されている<sup>7)</sup>。また、蛍光ガラス線量計はリアルタイムに被ばく線量を測定することはできないが、小型であるため複数の素子を同時に使用した広範囲の被ばく線量分布測定やファントムを利用した実効線量の評価も可能であると考えられ、TLDに代わってより正確な患者の被ばく管理ができるものと期待できる。

## 5. ま と め

蛍光ガラス線量計・小型素子システムのX線診断領域の線量測定における基本特性を検討し、以下の結論を得た。①測定値はプレヒートを繰り返して行っても影響を受けず、線量を監視しながら長期間の積算線量を

評価することが可能であり、外部放射線量の測定に適する。②ガラス素子内部の線量勾配と蛍光読取り機構のズレに起因すると考えられる素子読取り方向による測定値の変動が存在する。この変動は自由空間中で散乱線を含まない条件では約5%と比較的大きく、厳密な測定では注意を要する。③繰り返し読取り誤差、読取り方向による誤差、素子の感度バラツキを含む測定値の全体的な変動は、変動係数で3%以下と良好であり正確な線量測定が期待できる。④診断用X線のエネルギー範囲ではエネルギー補償フィルタの有無にかかわらずガラス素子の感度変化は小さい。校正定数を求めておけばフィルタ無の素子でも線量測定が可能であり、皮膚の被ばく線量評価に有用である。

## 6. 謝 辞

本研究にご協力いただいた、川崎医療短期大学放射線技術科第28期生の木曾田勝彦、白井清教、竹ノ内宏臣、三好孝昌、田川幸治の各氏に心より感謝いたします。

## 7. 文 献

- 1) 野村貴美, 池上 徹, 寿籐紀道: 個人被ばく線量の最近の展開, I. 蛍光ガラス線量計, RADIOISOTOPES 51: 85-95, 2002.
- 2) 都丸禎三: "Dose Ace", 新小形ガラス素子の特性, フィルムバッジニュース No. 288: 1-4, 2000.
- 3) Tuda M: A Few Remarks on Photoluminescence Dosimetry with High Energy X-Rays, 医学物理 20: 131-139, 2000.
- 4) 寿籐紀道: ガラスバッジによるモニタリングサービス, フィルムバッジニュース No. 307: 10-14, 2002.
- 5) 能勢隆之, 小泉雅彦, 西山謹司, 吉田 謙: ガラス線量計を用いた組織内照射線量の実測—直腸前壁の線量について, 日本医学放射線学会誌 61: 540-542, 2001.
- 6) 鈴木昇一, 浅田恭生, 古賀佑彦: 診断領域X線における被ばく線量測定のための線量計素子の検討, 医学と生物学 144: 25-29, 2002.
- 7) 小宮 勲, 白坂 崇, 梅津芳幸, 橋 昌幸, 泉 隆: 蛍光ガラス線量計による患者被ばく線量測定—特性評価と腹部 IVR 時の患者皮膚線量測定—, 日本放射線技術学会雑誌 60: 270-277, 2004.
- 8) 名古安伸: 蛍光ガラス線量計特性—放射線治療領域—, 日本放射線技術学会雑誌 61: 1420-1425, 2005.
- 9) 寿籐紀道: ガラスバッジによるモニタリングサービス⑤, フィルムバッジニュース No. 312: 6-10, 2002.
- 10) 塩田泰生, 田伏勝義, 青山祐一, 三宅良和: 蛍光ガラス線量計の読み値のバラツキの検討, 医学物理 26 Sup. 3: 209-210, 2006.
- 11) 旭テクノグラスサイテック事業部: 蛍光ガラス線量計・小型システム Dose Ace 基本特性資料, 旭テクノグラス株式会社, 静岡, 2000.