

# 強度変調放射線治療におけるガラス線量計を用いた 吸収線量測定法に関する研究

—ガラス線量計を用いた第3者の線量評価システムの構築に向けて—

首都大学東京大学院  
人間健康科学研究科

橋本 慎平

## 1. はじめに

強度変調放射線治療 (Intensity Modulated Radio Therapy, IMRT) は、従来の3次元原体照射を発展させた腫瘍への線量集中性と危険臓器への線量低減が可能な照射法である。IMRTを行う際は、各施設で十分な治療装置・治療計画装置のコミッショニングが必要であり、このコミッショニングの精度に出力線量精度は大きく左右される。米国で行われた多施設調査によると、2008年では20%の施設で許容値の7%を超える線量誤差が確認されている<sup>1,2)</sup>。施設間の出力線量のばらつきは施設間の治療成績の評価を困難にし、放射線治療の均てん化の妨げとなる可能性がある。そのため、IMRT実施施設が急増している本邦においても各施設のIMRTの出力線量の実態調査が必要であることは明らかである。

線量勾配が急峻であるIMRTの場合、電離箱線量計のサイズの影響で評価点での吸収線量の評価が不確かとなるが、ガラス線量計は非常に小型で線量勾配の影響を除外した線量の評価が可能であり、IMRTにおける線量測定に適していると考えられる。また、医用原子力技術研究振興財団により通常の放射線治療における郵送調査によるガラス線量計を用いた校正条件の第3者の評価が行われていることなどから、ガラス線量計を用いたIMRTの第3者線量評価への応用も期待できる。しかし、ガラス線量計を用いたIMRTの線量測定は確立されていないのが現状である。

## 2. 目的

本研究において我々は、IMRTビームにおける線量測定法を確立するために、以下の項目について検討を行った。

- 1, ガラス線量計を用いたIMRTビームにおける線量測定法の決定
- 2, 多施設での電離箱線量計とガラス線量計を用いたIMRT線量測定

これらの項目を検討し、ガラス線量計を用いたIMRTの第3者の線量評価システムを実用化することを本研究の目的とする。

### 3. ガラス線量計を用いた IMRT ビームにおける線量測定法の決定

#### 3. 1 はじめに

ガラス線量計は銀イオンを含有した銀活性リン酸塩ガラス素子で、組成は 11.0% Na, 31.55% P, 51.16% O, 6.12% Al, 0.17% Ag で、実効原子番号は 12.039 で密度は  $2.61 \text{ g cm}^{-3}$  である。ガラス素子は電離放射線を照射されると蛍光中心を作り、紫外線を照射されると蛍光中心が励起して、安定状態にもどるときにオレンジ色の光 (Radio photo luminescence, RPL) を発する。この RPL 量は吸収線量と比例しているため、あらかじめ電離箱線量計との校正により求めていた校正定数を RPL 量に乗ずることで水の吸収線量を求めることができる。また、ガラス線量計はフェーディング効果が問題にならず、線量に対して優れた直線性を有した線量計である。さらに、蛍光中心は一度 RPL 量を測定しても消失しないため、繰り返しの測定が可能となり、素子の汚れなどによる読み値の変動を低減することができる。しかし、ガラス素子の原子番号および密度は水と比較すると高い。そのため、ガラス素子のエネルギーに対する感度の変化は水とは異なり、校正時と異なるエネルギーや照射野の場合は補正が必要となる可能性がある。また、同じ吸収線量を照射して求める校正定数は不確かさを含むため測定精度に影響を及ぼす。そのため、ガラス線量計を用いた IMRT 線量測定の精度に影響を及ぼす、読み値の変動、校正定数の再現性、線質の変化に対するガラス素子の感度の変化について検討し、線量算出法を決定した。

#### 3. 2 方法

##### 3. 2. 1 繰り返しの読み値の変動、校正定数の再現性

ガラス線量計 (GD-301, 旭テクノガラス) 40 本を用いて、水中深 10 cm に、ガラス線量計と電離箱線量計 (TM30013, PTW) を交互に設置し、放射線治療装置 (Clinac 21EX Varian ME.) を用いて 6 MV X 線を基準条件 (水中 10 cm 深, 照射野 10 cm × 10 cm) にて 2 Gy 照射し、電離箱線量計により水吸収線量を、ガラス線量計により RPL 量を測定した。ガラス線量計は電離箱線量計と同形状の専用の鞘 (図 1) に充填し水中に設置した。RPL 量は 5 回測定の平均値としたが、5 回の標準偏差を計算し、繰り返しの読み値のばらつきを求めた。また、素子ごとに水吸収線量を基準とした校正定数 (=電離箱線量計で求めた水吸収線量 / RPL 量) を求め、同一の測定を別の日に行い、素子のごとの校正定数の再現性を求めた。

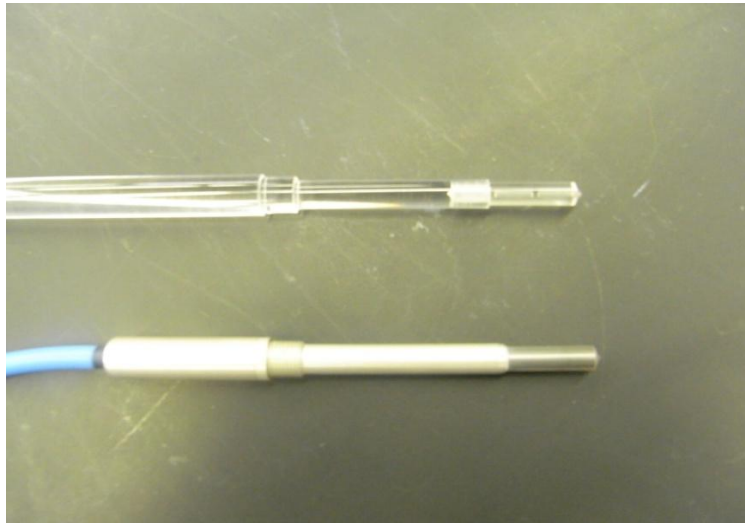


図1 ガラス線量計専用鞘

### 3. 2. 2 線質依存性の検討

水中深 10 cm に、ガラス線量計と電離箱線量計を交互に設置し、ライナック装置を用いて 4 MV, 6 MV, 10 MV X 線を照射し、エネルギーごとに水吸収線量を基準とした校正定数を求めた。照射野が変化することにより線質も変化するため、照射野を 5 cm×5 cm から 20 cm×20 cm まで変化させた場合の校正定数を求めた。

また、モンテカルロシミュレーションコードの EGSnrc コード<sup>3)</sup>の中の一つで、円筒形の空洞内の吸収線量を計算するための CAVRZnrc コードを用いて、4MV, 6 MV および 10 MV の X 線を照射した場合と、照射野を変化させた場合の実測と同条件でシミュレーションを行いガラス線量計および水の吸収線量を求め、校正定数 (=水吸収線量/ガラス吸収線量) を算出した。

IMRT ビームはマルチリーフコリメータ (Mulch Leaf Collimator, MLC) を透過した X 線を多く含むことから、MLC を透過後の X 線に対するガラス素子の感度の変化についてもシミュレーションを行った。

### 3. 2. 3 線質依存性の解析

ガラス線量計の線質依存について EGSnrc コードを用いてガラス素子に対する水の平均質量エネルギー吸収係数比  $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{w, glass}}$ 、平均制限質量衝突阻止能比  $(\bar{L}/\rho)_{\text{w, glass}}$  を計算した。

また、ガラス線量計の全体の吸収線量の中で、ガラスの外側の水で発生した電子による寄与の割合  $d$  と、ガラス内で光子が起こした相互作用により発生した電子が吸収線量に与える割合  $(1-d)$  を計算した。

### 3. 2. 3. 1 $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{w,glass}}$ の決定

$(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{w,glass}}$  は以下の式で表すことができる。

$$\left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{w,glass}} = \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} \Phi(E) E (\mu_{\text{en}}(E)/\rho)_{\text{w}} dE}{\int_0^{E_{\text{max}}} \Phi(E) E (\mu_{\text{en}}(E)/\rho)_{\text{glass}} dE} \quad (1)$$

ここで  $\Phi(E)$  ガラス内に入る光子のフルエンスで、フルエンス計算用のモンテカルロコードである FLURZnrc コードを用いて計算した。またエネルギーごとの  $(\mu_{\text{en}}(E)/\rho)_{\text{w,glass}}$  のデータは Hubbell<sup>4)</sup>らの値を採用した。

### 3. 2. 3. 2 $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,glass}}$ の決定

各エネルギーの  $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,glass}}$  は平均制限衝突阻止能比計算用のモンテカルロコードである SPRRZnrc コードを用いて計算した。計算の際に設定するカットオフエネルギーは予め求めておき、920 keVとした。

### 3. 2. 3. 3 $d$ および $(1-d)$ の算出

$d$ と $(1-d)$ はCAVRZnrcコードを改良したオリジナルコードを用いて計算した。まず、各エネルギーにおいて、基準条件にてシミュレーションを行い、ガラスの吸収線量（全吸収線量）を計算した。次に、 $(1-d)$ を求めるためのシミュレーションを行った。同一ジオメトリにてシミュレーションを行うが、水中で発生した電子がガラスに入る場合は粒子の追跡を終了させ、ガラス内で光子の相互作用で発生した電子のみの寄与による吸収線量 $(1-d)$ を計算した。さらにあらかじめ求めていた全吸収線量から $(1-d)$ を差し引くことで、水で発生した電子の寄与による吸収線量 $d$ を求めた。

## 3. 3 結果

### 3. 3. 1 繰り返しの読み値の変動，校正定数の再現性

5回繰り返したガラス素子の読み値の標準偏差の平均値は0.4%となった。また、図2に素子ごとの相対校正定数を示した。校正定数は同一条件で行った3回の測定の平均値で、エラーバーは標準偏差である。感度の均一性について見てみると、素子間の校正定数は大きく異なることが確認された。これは、読み取り装置に起因するものが大きいですが、素子ごとに校正定数を与えることで軽減することが可能である。

また、今回の測定結果では、再現性は1SDで1.0%となった。Mizunoらのデータ<sup>5)</sup>では0.8%，荒木らのデータ<sup>6)</sup>は1.1%であり良い一致を示した。

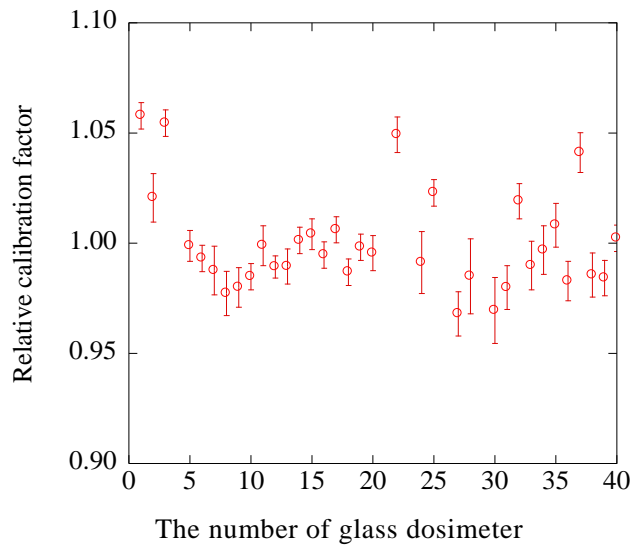


図2 各ガラス素子の校正定数の相違

### 3. 3. 2 線質依存性

6 MV X線を基準とした各エネルギーの校正定数を図3に示す。実測において、4 MVでは校正定数は0.992となり、10 MVでは校正定数は1.010となった。また、実測値とシミュレーションの結果は0.2%以内で一致した。このことから、照射するエネルギーが低くなるとガラス線量計の感度は高くなり、エネルギーが高くなると感度は小さくなることが確認された。そのため、IMRTビームの測定の際は、施設で使用する照射エネルギーに合わせた補正が必要になると考えられる。

6 MVおよび10 MV X線において照射野を変化させた場合の校正定数を図4に示した。10 cm×10 cmの照射野を基準とした結果であるが、6 MV X線において照射野が20 cm×20 cmでは校正定数は0.982、5 cm×5 cmでは1.003となった。10 MV X線では照射野20 cm×20 cmの変化が小さかったものの、同様の傾向を示した。また、シミュレーションによる結果を図5に示したが、実測と良い一致を示した。照射野が大きくなると低エネルギー光子が増えるので感度は高くなり、逆に照射野が小さくなると低エネルギー光子が減るため感度は低下したと考えられる。照射野が基準条件より大きな場合は校正定数が2%近く変化することもあるため補正が必要であるが、照射野が小さくなった場合の感度の変化は6 MV、10 MVともに0.3%と小さい。ガラス線量計を用いた郵送線量測定では比較的小さな照射野のIMRTプランを用いることを予定しているため、照射野サイズによる補正は考慮する必要はないと考えられる。

また、シミュレーションより求めたMLC透過後の校正定数は、6 MVで1.007、10 MVで1.009となったが、Fujitaらの報告<sup>7)</sup>によるとIMRTプランにおいてPTV中心の光子のエネルギースペクトルは基準照射野のものと比べてもほとんど変わらず、実際のIMRTプランの測定においてはMLCの影響は無視できると考えられる。

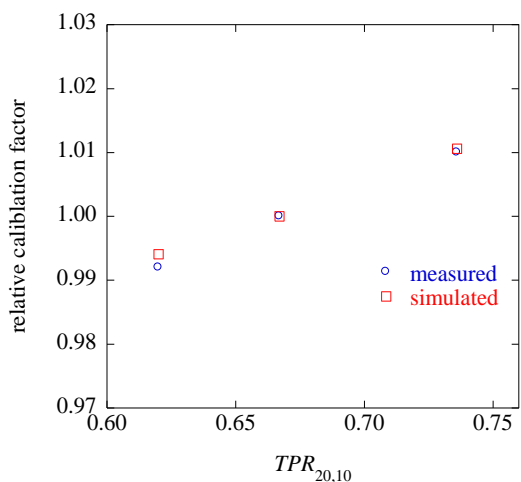


図3 エネルギーによる校正定数の変化

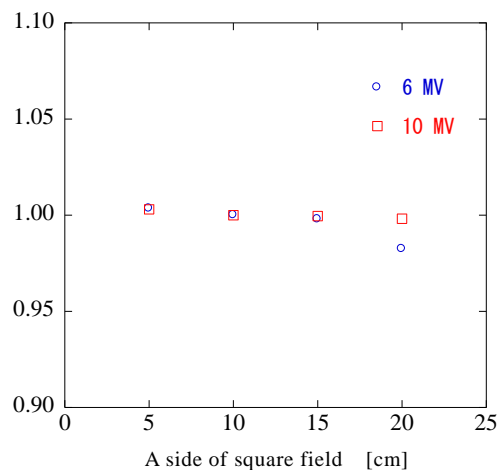
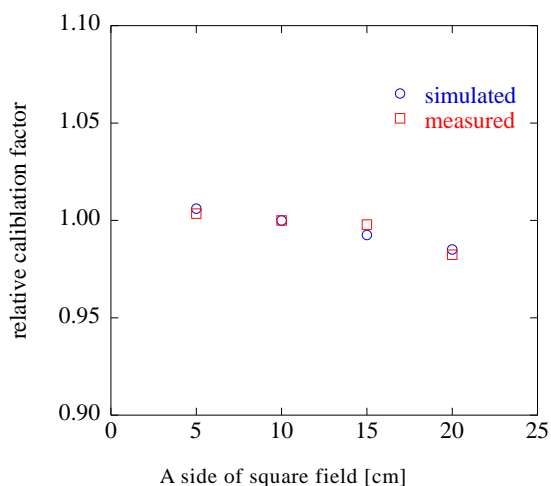
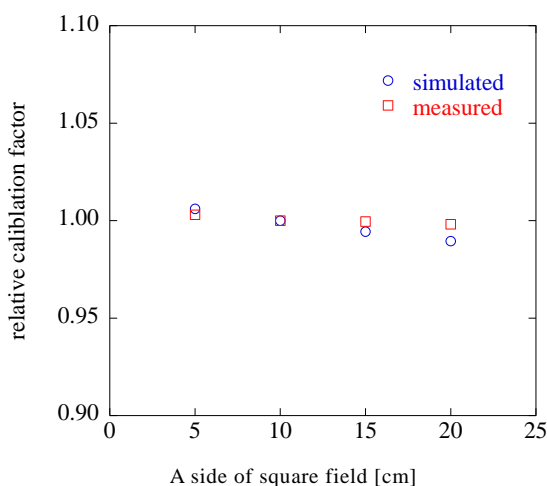


図4 照射野による校正定数の変化



b) 6MV



a) 10MV

図5 照射野による校正定数の変化

### 3. 3. 3 線質依存性の解析

エネルギーを変化させた場合の  $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{w,glass}}$ ,  $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,glass}}$  の変化を図6に示した。 $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{w,glass}}$  は6 MVを基準とすると4 MVでは1.007, 10MVは0.985となり, 実測による校正定数の変化と異なった。ガラス線量計のエネルギーによる感度の変化の原因は  $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{w,glass}}$  の変化と言われていたが<sup>5)</sup>, 高エネルギー領域では他の因子もエネルギーレスポンスに影響を与えることが示唆された。また,  $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,glass}}$  もエネルギーによって変化したが実測により求められた校正定数の変化とは異なった。

表 1 にエネルギーを変化させた場合の  $d$  および  $1-d$  の変化を示した。6 MV では素子内の光子の相互作用に起因する割合が 39% で、外からの電子は 61%、10 MV では素子内の光子の相互作用により発生した電子に起因する付与率が 25% で外からの電子は 75% であった。このことから、照射するエネルギーが変化することにより、外から流入する電子および素子内での相互作用により発生した電子の線量への寄与の割合も変化することが確認された。そのため、エネルギーレスポンスの変化は制限衝突阻止能比の変化と質量エネルギー吸収係数比の変化を両方考慮して考えなくてはならないことが明らかとなった。

ガラス線量計のような検出器内でも光子が相互作用を起こすような場合、Bragg-Gray の空洞原理ではなく、中程度のサイズの空洞に拡張した Burlin の空洞理論で説明できる可能性がある。Burlin の空洞理論をガラス線量計による吸収線量測定に適用すると以下の式で表すことが可能である。

$$D_{w,\text{glass}} = d \left( \frac{L}{\rho} \right)_{w,\text{glass}} + (1-d) \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{w,\text{glass}} \quad (2)$$

(2)式を用いて計算したエネルギーを変化させた場合の校正定数の変化を図 7 に示した。実測の値と比較すると 0.2% 以内の一致を示した。この結果から、ガラス素子の照射エネルギーによる感度の変化の要因は、平均質量エネルギー吸収係数比のみの変化や、平均質量制限衝突阻止能比のみの変化だけではなく、それら両方を考慮した Burlin の空洞理論を利用することで説明できることが示された。

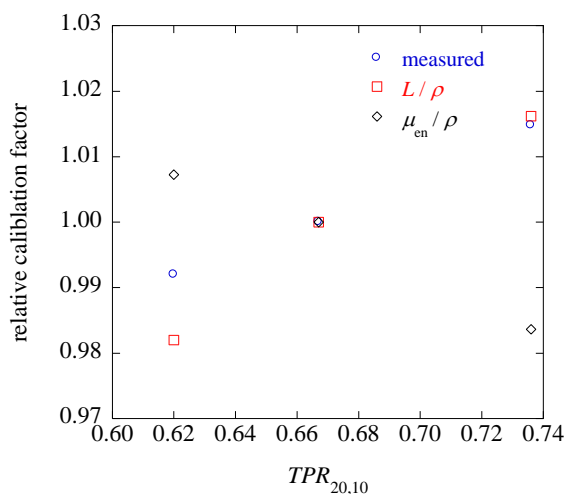


図 6 エネルギーによる  $(L/\rho)_{w,\text{glass}}$ 、 $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{w,\text{glass}}$  および校正定数の変化

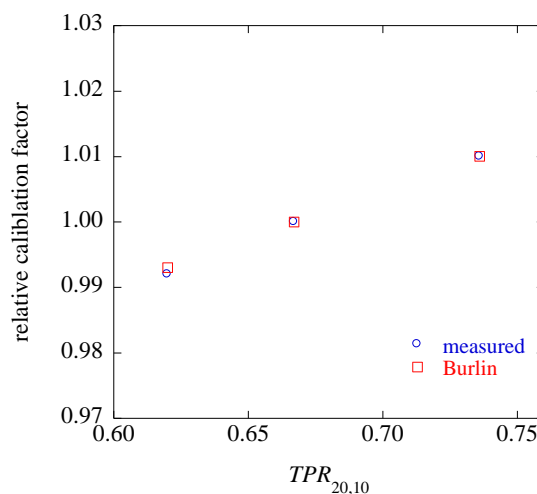


図 7 エネルギーによる校正定数の変化 (実測値と理論値の比較)

表 1 エネルギーごとの  $d$  および  $1-d$  の変化

	4 MV	6 MV	10 MV
$d$	51%	61%	75%
$1-d$	49%	39%	25%

### 3. 4 訪問測定時の IMRT 吸収線量算出法の決定

IMRT ビームにおいて、ガラス線量計の線量測定に影響を及ぼす要因は照射野の変化や MLC 透過による線質の変化であるが、3. 3 での結果を踏まえるとそれらを補正しなくても高精度な測定が可能であると考えられる。そのため、IMRT ビームの線量測定の際も素子間の感度補正とエネルギー補正を行うことで電離箱線量計と比較しても十分な精度の測定が可能であると考えられ、多施設訪問測定時の吸収線量は以下の式にて算出することに決定した。

$$D = \sum_{i=1}^6 (M_i \times k_i) \times \frac{D_{IC}}{\sum_{i=7}^{12} (M_i \times k_i)} \quad (3)$$

$M_i$  は素子番号  $i$  のガラス素子の読み値で、 $D_{IC}$  は訪問施設で基準条件にて電離箱線量計で測定した水吸収線量、 $D_{IC} / \sum_{i=7}^{12} (M_i \times k_i)$  はエネルギー補正を行うための係数である。今回の測定では 14 個の素子を用いて、ナンバー1~6 は IMRT プラン用、ナンバー7~12 は基準条件での照射用、2 個はバックグラウンド用とした。

また、この式を用いた場合の吸収線量の不確かさを表 2 に示したが合成相対標準不確かさは 1.3% となり、高精度での測定が可能であることが示された。この値は、Mizuno らが示した<sup>5)</sup>1.6% より小さな値となったが、本法ではエネルギー補正係数の不確かさやファントム補正係数による不確かさを含まないためであると考えられる。

表 2 各項目の相対標準不確かさと、ガラス線量計を用いた線量測定の合成相対標準不確かさ

項目	相対標準不確かさ [%]
読み値 $M$	0.4
校正定数 $k$	1.0
電離箱線量計の吸収線量 $D_{IC}$	1.8
合成不確かさ	1.3



## 4 多施設での電離箱線量計とガラス線量計を用いた IMRT 線量測定

### 4.1 方法

電離箱線量計とガラス線量計を用いて IMRT の多施設訪問線量測定を行った。訪問測定用に開発された水ファントム内 (図 8) に電離箱線量計とガラス線量計を交互に設置して、基準条件にて 1 Gy になる照射と、IMRT プランの測定を行った。IMRT プランは、National Cancer Institute の IMRT ベンチマークテスト<sup>8)</sup>で使用されている計画標的体積(PTV)と危険臓器(OAR)の配置および輪郭 (図 9) を用いて、表 3 の線量制約を満たすものとした。

電離箱線量計で求めた IMRT プランの水吸収線量は、標準測定法 01<sup>9)</sup>に従い決定した。ガラス線量計による出力線量は(3)式で決定した。

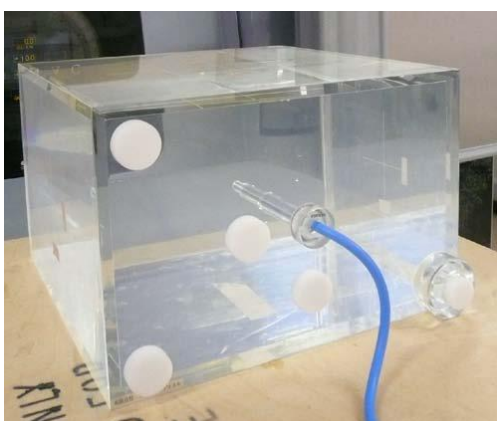


図 8 訪問測定用水ファントム

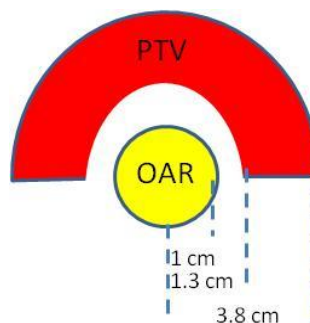


図 9 PTV と OAR の配置と輪郭情報

表 3 IMRT プランの線量制約

評価項目	criteria
照射門数	4-9 門
OAR V60% (120 cGy)	$\leq 5\%$
PTV V95% (190 cGy)	$\geq 95\%$
$D_{\max}$	In PTV
PTV V120% (240 cGy)	$\leq 10\%$

### 4.2 結果および考察

図 10 に、各施設にて行った IMRT プランの電離箱線量計で求めた線量に対するガラス線量計で求めた線量の相対偏差を示した。すべての施設で電離箱線量計に対する偏差は 3%以内となり、8 施設では 1.5%以内の一致を示した。標準偏差は 1.5%と電離箱線量計と比較しても十分な精度での測定が可能であることが示された。また、表 2 に示したガラス線量計により求められる吸収線量の不確かさと比較すると、施設評価の結果が 0.2%大きな値とな

った。これは、照射野によってもガラス線量計のレスポンスは変化するが、今回はそれらの不確かさなどは考慮していないため、このような結果となったと考えられる。しかし、照射野などの不確かさを考慮しなくても理論値と近い結果となったことから、ガラス線量計を用いた IMRT の線量測定において今回提案した方法で測定を行えば、電離箱線量計で測定した場合と比較しても十分な精度での測定が可能であると言える。

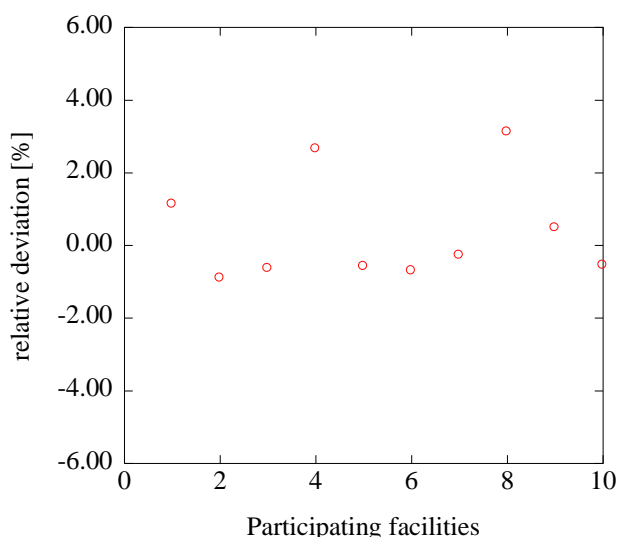


図 10 各施設における IMRT プランの電離箱線量計とガラス線量計での測定結果の相違

## 5. まとめ

本研究で我々は、測定および加速器を再現したビームでのモンテカルロシミュレーションにより基礎検討を行い、ガラス線量計を用いた IMRT の線量測定法を確立した。さらに、多施設で IMRT の吸収線量を電離箱線量計とガラス線量計で比較し、我々が提案する方法により高精度で吸収線量の取得が可能となることを示した。

郵送測定の際は、(3)式にエネルギー補正係数  $f_E$  とファントム補正係数  $f_p$  を加えた以下の式にて線量を取得する予定である。

$$D = \sum_{i=1}^6 (M_i \times k_i) \times f_E \times f_p \times \frac{D_{IC}}{\sum_{i=7}^{12} (M_i \times k_i)} \quad (4)$$

エネルギー補正係数は、今回計算したシミュレーション結果から算出した近似式により決定する予定である。近似式から求めたエネルギー補正係数と、訪問施設にて求めた測定したエネルギー補正係数を図 11 に示した。近似式により算出されたエネルギー補正係数の不確かさは 0.4% だが、実測の値も 0.4% 以内にすべて含まれる結果となり、今回示した方法により十分な精度でエネルギー補正が可能となることが明らかとなった。その他のパラメ

一夕については今後検討を行う予定であるが、それらが大きな不確かさを含む可能性は低く、今回算出した不確かさと同程度の結果になることが考えられる。

これらの結果を踏まえると、郵送に移行した場合でも医用原子力研究振興財団が行っているガラス線量計による郵送線量測定と比較しても、同等な精度で吸収線量を求めることができると考えられる。そのため、今後は試験的に郵送測定を行い、ガラス線量計によるIMRTの郵送による線量測定を本格的に進めていく予定である。

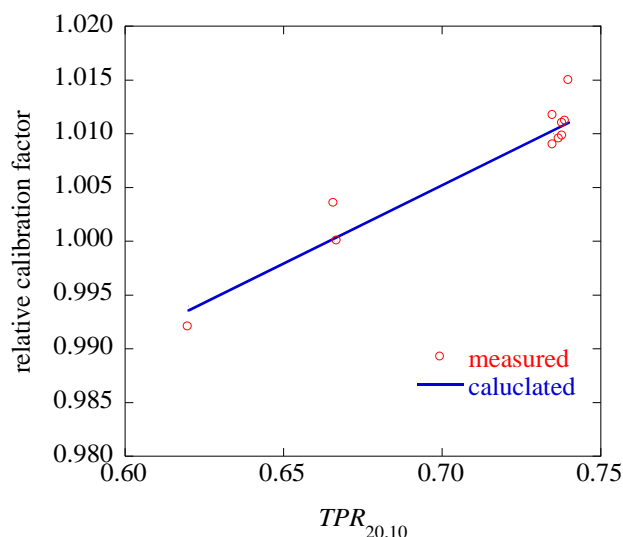


図 11 近似式から求めたエネルギー補正係数と測定値の比較

## 6. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、助成いただきました財団法人医用原子力技術研究振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究において有益なご助言、ご指導を頂きました首都大学東京大学院の齋藤秀敏教授、研究協力者として参加して頂いた千葉県がんセンターの河内徹先生、小島徹先生、遠山尚紀先生、首都大学東京大学院の藤田幸男先生に深く感謝を申し上げます。

## 7. 参考文献

- 1) A. Molineu, et. al., Design and implementation of an anthropomorphic quality assurance phantom, for IMRT for RTOG. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 63: 577-583, 2005.
- 2) A. Molineu, et. al., Has IMRT delivery improved in the last 5 years? AAPM 2008. Poster, SU-GG-T-159.
- 3) I. Kawrakow and D.W.O. Rogers, The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. NRCC Report PIRS-701 2006
- 4) Hubbell J.H. and Seltzer S.M.: Table of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements  $z=1$  to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. From NIST X-ray attenuation Databases.

- 5) Mizuno, H., Kanai, T., Kusano, et al., Feasibility study of glass dosimeter postal dosimetry audit of high-energy radiotherapy photon beams. *Radiother. Oncol.* 86, 258–263, 2008
- 6) 荒木不次夫, 守部伸幸 他, 蛍光ガラス線量計を用いたナロービームにおける線量の高度評価に関する研究報告 日本放射線技術学会雑誌 第 60 巻 7 号 2004 年
- 7) Fujita, Y., Tohyama, N., et al., Determination of IMRT Beam Characteristics with Monte Carlo simulation. *IFMBE Proc.* Vol.25 (2009) pp.476-478
- 8) IMRT Benchmark. Providence, RI: Quality Assurance Review Center, Available at: <http://www.qarc.org/benchmarks/IMRTbenchmark.pdf>. Accessed March 24, 2004.
- 9) 日本医学物理学会編: 外部放射線治療における吸収線量の標準測定法, 通商産業研究社, 2002.