

卒業論文

題目：蛍光ガラス線量計を用いた電子線線量計測の精度検証
および郵送調査における有用性の検討に関する研究

大阪大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

(指導：医用工学物理講座 松本 光弘 准教授)

05C10006 魚澤里奈

(平成 25 年 12 月 6 日 提出)

要旨

【目的】

蛍光ガラス線量計(GD-302M 旭ガラス社製:GD)は RPL 現象での発光量を利用した固体線量計である。この蛍光ガラス線量計を用いて、電子線照射における測定精度を検証するとともに、他施設への郵送線量調査に適したデバイスであるかどうかを検討した。

【方法】

- ① リニアック治療装置 Siemens 社製 ARTISTE を用いて電子線 9MeV,12MeV でタフウォーターファントムを使用し治療有効深にGDを配置し、それぞれ 200MU を照射し FGD-1000 で測定した。さらに線量依存性も 50MU,100MU,150MU,200MU で測定した。
- ② 電子線照射を実施している 5 施設に、GD を 2 つのエネルギーに各 5 本ずつ照射してもらうため計 10 本を郵送した。照射方法としては、ファーマー模擬ファントムを使用し、先端部分に GD を挿入した PTW300013 型ガラス素子測定用ファントム(防水型)及び水ファントムを用い任意深にて、2Gy 照射してもらうように依頼した。返送されてきた GD は、返却後すぐにプレヒート処理をし、計測した。計測値の誤差から、GD の郵送調査の実用性について検討した。

【結果】

- ① ARTISTE による照射では、誤差-3.65%以内で、線量直線性の実測値と計算値との相関係数は 0.998 であった。
- ② 各施設での電子線郵送調査の誤差を表 1 に示した。

表 1

誤差(%)	病院A	病院B	病院C	病院D	病院E
6MeV	-1.6±0.8	0.2±1.0	0.7±0.8	-1.0±1.7	0.8±0.8
9MeV		1.2±0.8		-1.2±1.0	0.6±0.7
10MeV	3.8±1.5				

【考察】

以下の結果により、郵送調査は最大 3.8%の誤差があるものの、9 ビームの誤差平均は 0.39%であった。照射後すぐに測定した結果と郵送調査の結果は不確かさの範囲 ($k=2$, 5.3%) であり、蛍光ガラス線量計による電子線郵送調査は有用であると考えられる。

1. 序論

1.1 背景

放射線治療の領域における照射線量、治療用照射装置の出力線量が全国的に同一基準であることががん治療及び臨床研究の基本である。放射線治療の品質保証を行う上で、治療にかかわる装置の保守管理が非常に重要となる。

照射線量の品質保証は本来各施設において実施すべきであるが、近年ではそれに加えて第三者的検証の重要性に対する認識が高まってきており、線量計を郵送して照射装置の出力確認を IAEA(International Atomic Energy Agency)や WHO(World Health Organization)を始めとした第三者機関が行う第三者評価プログラムに、全世界の約 60%の施設が参加している¹⁾。

過去 20-30 年の間、熱ルミネセンス線量計 (TLD) が郵送調査の標準的な測定器として広く使用されてきた。²⁾ TLD は、測定結果の比較評価が容易なことなど利点も多いが、フェーディングにより夏期に値が低下する場合があること、1 回の読み取りで線量情報が消えてしまうこと、素子が破損し易く大量素子の自動読み取りができないことなどの欠点をもっている。近年、これらの点で優れた積算線量計として蛍光ガラス線量計が注目されるようになり³⁾、本邦では公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 (ANTM) が、第三者評価機関として蛍光ガラス線量計の「治療用照射装置の出力線量測定業務」を平成 19 年 11 月 1 日から開始しているが、X線のみのものである¹⁾。そこで、高エネルギー電子線でも郵送調査の第三者評価が有用かどうかを検討した。

1.2 蛍光ガラス線量計

1.2.1 蛍光ガラス線量計の原理

蛍光ガラス線量計システムは、銀イオンを含有した銀活性リン酸塩ガラス素子と読取装置 (リーダー) からなる。蛍光ガラス素子の組成は、重量%で 31.55% P、51.16% O、6.12% Al、11.0% Na、0.17% Ag である。実効原子番号 $Z=12.039$ 、密度 $\rho=2.61$ である⁴⁾。

蛍光量が放射線量に比例することから線量計に応用されている。放射線の照射によって生じた RPL 中心は、読取操作によって消滅することがなく、何度でも繰返し読み取りができる真の積算型固体線量計である。

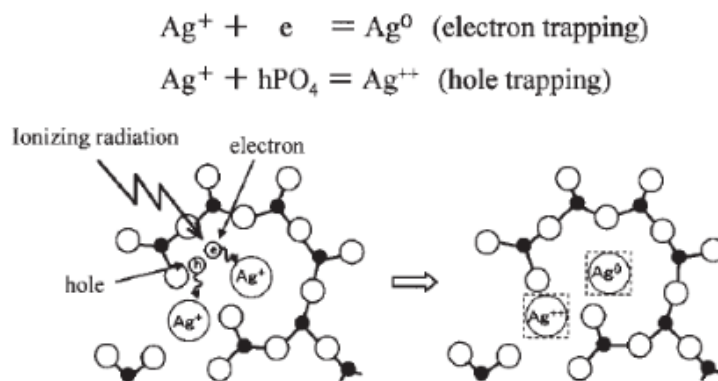


Fig.1 RPL の中心の形成

電離放射線が銀活性リン酸塩ガラスに照射されると、電子及び正孔（ホール）が叩き出され、電子はガラス構造中の Ag^+ に捕獲され、 Ag^0 となる。一方、正孔は一旦 PO_4 四面体に捕えられるが、時間の経過とともに Ag^+ へ移行し、より安定な Ag^{++} を形成する。(Fig.1) これらの Ag^0 及び Ag^{++} が共にガラス中で RPL 中心（蛍光中心）となる⁵⁾。

本研究では治療用蛍光ガラス線量計素子 GD-302M を用いた。測定線種は電子線、測定線量範囲は 1Gy~100Gy、素子サイズは直径 1.5mm、長径 12mm である。

ガラス線量素子（GD-300 シリーズ）の特徴としては、

- ① 繰り返し読み取りが可能
- ② 素子間のばらつきが小さい
- ③ フェーディングがほとんどない
- ④ 超小型素子

があげられる⁵⁾。

1.2.2 蛍光ガラス線量計の使用手順

ガラス素子に欠損・汚れ・白曇りがあると励起光が拡散され正確な読み取りができない⁵⁾。使用前に外観検査として、素子の欠損・汚れ・を確認し、欠損のあるものは使用を控え、汚れがあるものは汚れをアルコールシートでふき取った。その後、ガラス素子に蓄積した積算線量を消失させるために 400℃で 20 分間のアニール処理を行った。

その後照射を行った。放射線が照射されたガラス素子にはラジオホトルミネセンスの蛍光量が時間の経過とともに増加して安定化するというビルドアップ特性がある。この時間変化を短時間で完了させるため、プレヒート処理を行う。

⁵⁾ 本研究では 70℃で 40 分間のプレヒート処理を行った。



Fig.2 ガラス素子の外観

2. 目的

リニアック装置を用いて蛍光ガラス線量計に電子線を照射し、測定値と吸収線量（計算値）の誤差を求め、電子線測定の精度確認、線量依存性を検討した。

さらに、電子線測定の蛍光ガラス線量計の郵送線量調査に適したデバイスであるのか検証した。

3. 使用器具及び郵送先

・リニアック治療装置

装置名 ARTISTE
 製作会社 シーメンス旭メディテック
 出力 電子線 9MeV,12MeV

・蛍光ガラス線量計・小型素子システム Dose Ace (AGC テクノガラス株式会社)

・旭テクノガラス株式会社

線量計小型素子 高エネルギー測定用 GD-302M
 線量計リーダ FGD-1000
 読取マガジン FGD-M152
 アニールマガジン FGD-C101
 アニール用電気炉 NEW-1CT
 プレヒート用恒温器 DKN-302
 プレヒートトレー FGD-C102

・タフウォータファントム

・PTW30013 型ガラス素子測定用ファントム(防水型)

・水ファントム

・郵送協力

兵庫医科大学病院	Mevatron MD2 (Siemens 社製)
大阪府立急性期総合医療センター	Novalis Tx (BrainLAB 社製)
大阪医科大学附属病院	Clinac ix(Varian 社製)
大阪府立母子保健総合医療センター	Clinac iX (Varian 社製)
近畿大学医学部附属病院	CLINAC 21EX (Varian 社製)

4. 方法

4.1 電子線測定における精度確認

4.1.1 実験方法

リニアック治療装置 Siemens 社製 ARTISTE を用いて、電子線 9MeV,12MeV の 2 つのエネルギーでタフウォーターファントムを使用し治療有効深に蛍光ガラス線量計を配置し、 $10\times 10\text{cm}^2$, $15\times 15\text{cm}^2$, $20\times 20\text{cm}^2$ の 3 照射野にそれぞれ 200MU を照射した。

さらに線量依存性を調べるため、照射野 $10\times 10\text{cm}^2$ で蛍光ガラス線量計をそれぞれ 10 本ずつ 50MU,100MU,150MU を照射した。

照射後すぐに、 70°C で 40 分間のプレヒート処理を行った。プレヒート処理の終わったガラス素子は読み取り装置 (FGD-1000) で積算線量を計測した。リーダ使用時には、読み取り前に十分なウォーミングアップの時間 (本研究では、20 分) をおくようにした。3 回繰り返し読み取りを行い、測定値としてそれらの平均値を用いた。

4.1.2 測定配置

タフウォーターファントム ($30\times 30\times 5\text{cm}^3$) に中心より 1cm 間隔で GD を 5 個埋め込み、ファントム 2 枚でサンドウィッチした。(Fig.3, Fig.4) また、SSD は 100cm とし照射した。



Fig.3 ガラス素子の測定配置



Fig.4 照射野 10×10 の測定配置

4.1.3 深さスケーリング補正

水等価固形ファントムを用いた場合の測定深は、深さスケーリング係数や実効深を用いて水の等価深に変換しなければならない^{6) 7)}。本実験では、水等価タフウォーターファントム (Tough water WE211) を使用したので深さスケーリング係数を用いて水等価深を求め、PDD を決定した。

- ・深さスケーリング係数による方法

まず、Tough water WE211 の密度 ρ と測定深 d を用いて実効深さ d_{pl} を算出した。

$$d_{pl} = d * \rho_{pl} \quad \dots \text{式 (1)}$$

この実効深さ d_{pl} を用いて水等価深 d_w を算出した^{6) 7)}。

$$d_w = d_{pl} * C_{pl} \quad \dots \text{式 (2)}$$

Tough water WE211 の密度 ρ は 1.017、深さスケーリング係数 C_{pl} は 0.953 を使用した⁷⁾。求めた水等価深の結果は 9MeV で 2.91cm、12MeV で 3.88cm となった。Fig.5 からそれぞれの深さの PDD を求めた。また、9MeV と 12MeV の線量分布を Fig.6, Fig.7 に示した。

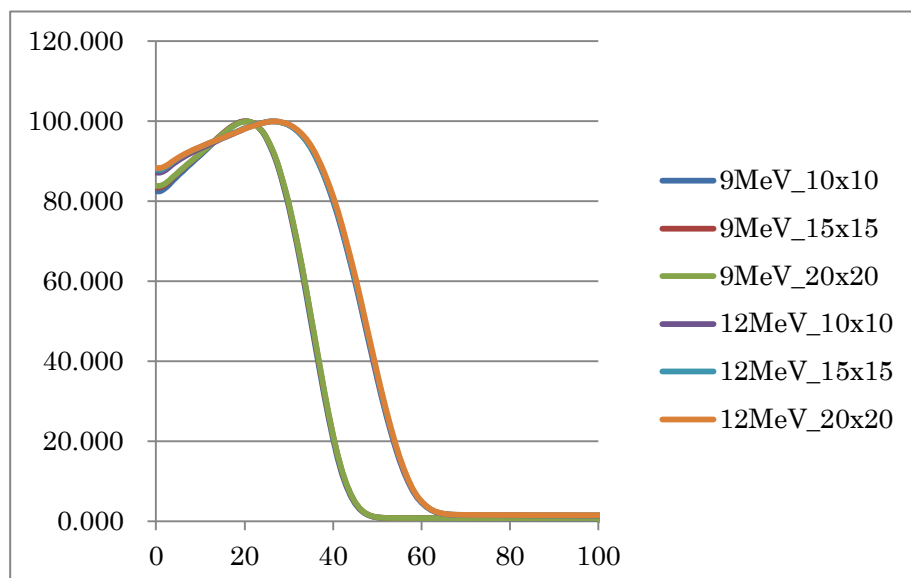


Fig.5 9MeV と 12MeV の PDD

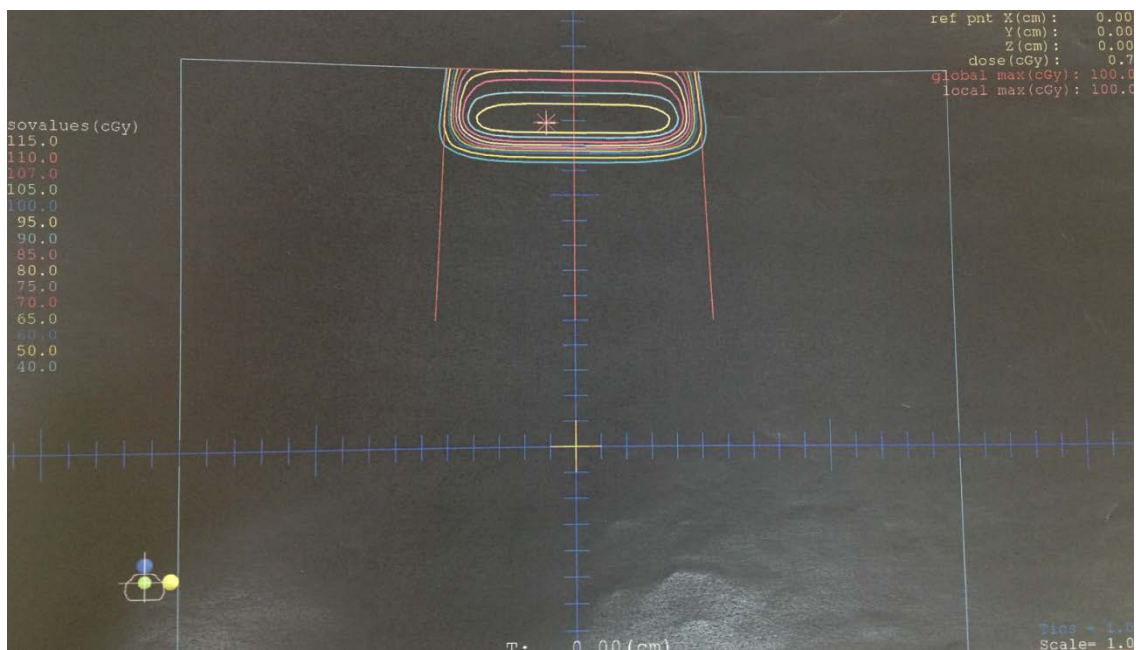


Fig.6 9MeV の線量分布

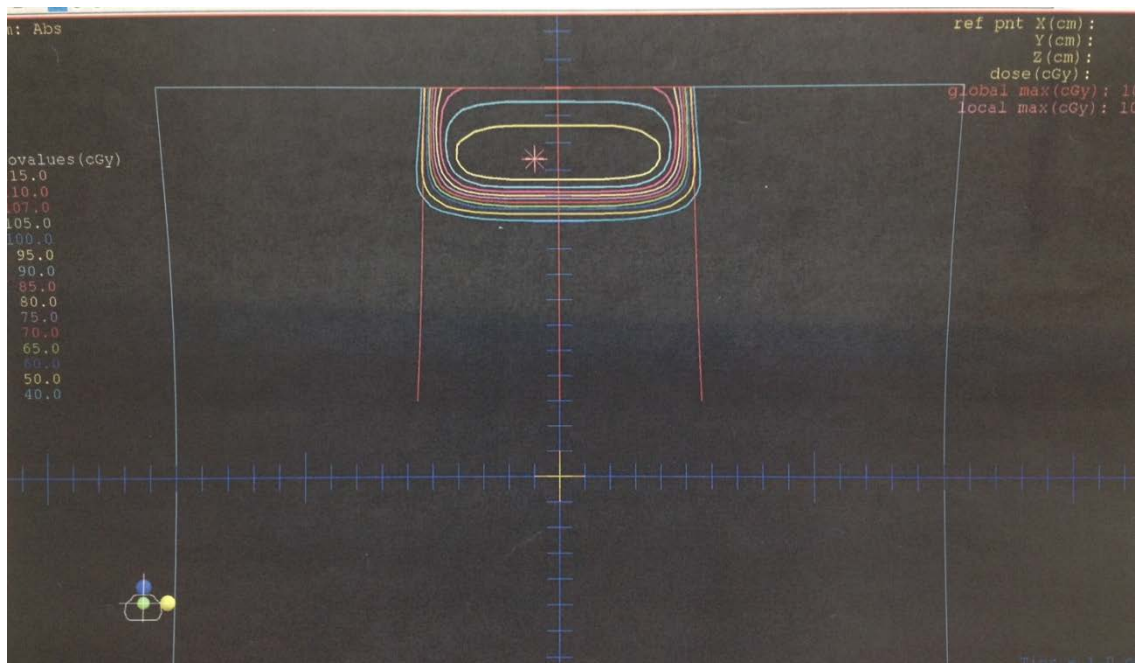


Fig.7 12MeV の線量分布

4.2 郵送調査

測定用素子セット (GD-302M) 20 本、測定用ファントム (PTW300013 形ガラス素子ファントム：防水型)、ガラス素子返送用として、日本郵便のレターパック 500、照射方法を示した手順書、照射時の条件などを記入してもらうための記入シートを、電子線照射を実施している 5 施設に、郵送した。

(Fig.8, Fig.9, Fig.10)



Fig.8 郵送セット



Fig.9 レターパック 500

＜別紙 1＞ 「照射データ記入シート」

1. 施設名

2. 装置名

3. 線量校正日 () 月 () 日

4. 公称エネルギー & R_{50}

① (MeV) , R_{50} () ② (MeV) , R_{50} ()

5. 任意照射野および任意測定深の PDD (小数点以下 1 桁まで) できれば治療有効深でお願いします。

エネルギー① (×) , (任意深 cm) PDD () [校正深、ピーク深、その他]

エネルギー② (×) , (任意深 cm) PDD () [校正深、ピーク深、その他]

6. Output Factor & DMU [cGy/MU]

OPF: エネルギー① () エネルギー② ()

DMU: エネルギー① () エネルギー② ()

7. 2 Gy 照射時の MU 値 (計算値)

エネルギー① () MU エネルギー② () MU

8. 蛍光ガラス線量計素子の照射日時

() 月 () 日 () 時

9. 照射した素子の ID 記録

エネルギー① 1) 2) 3) 4) 5)

エネルギー② 1) 2) 3) 4) 5)

10. 線量校正時の線量計指示値 読み値で結構ですが単位もご記入ください(データがあれば結構です)

エネルギー① 1) 2) 3) 4) 5)

エネルギー② 1) 2) 3) 4) 5)

11. 線量校正時に使用された各種係数値。単位もお願いします。できれば有効桁数 3~4 桁以上で

温度: 気圧: k_{tp} : k_s : k_{p01} : k_q :

k_s : k_{p01} : k_q :

N_{DH} : (N_c : k_{DX} :) 線量計名:

水ファントム名:

12. 照射野整形方法 (MLC 、 アプリケータ 、 その他 ())

*2Gy はあくまでも基準深 (最大線量深) での投与線量です。

Fig.10 データ記入シート

4.2.1 照射方法

ファーマー模擬ファントム（タフウォータ製：防水加工）の先端を左回しで開け、ガラス素子（GD-302M）を1個だけ奥まで入れ、続けてスペーサを入れる。このとき、ガラス素子の向きは、必ずID側から挿入してもらうよう依頼した。（Fig.11）

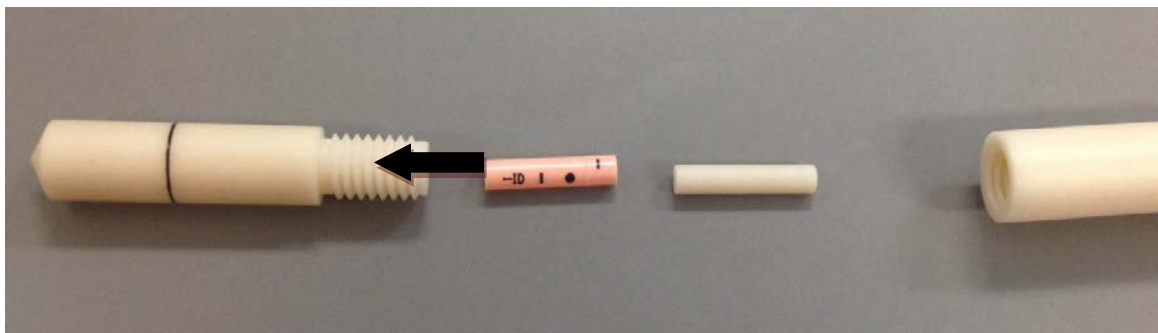


Fig.11 ファーマー模擬ファントム

この方向に挿入すると、ガラス素子の測定中心が模擬ファントムの線量計測定中心に一致する。

1照射につき1素子で行い、2Gyで5回ずつ（素子5個）照射する。エネルギーは2種類まで選択できる。素子のID番号が、キャップに記されているので、照射データ記入シートに記入してもらう。素子を保管する場合はデシケータ内で保管する。測定深については、基準深、校正深、任意深（治療有効深）のいずれかを選択してもらった。また、測定中心は幾何学中心で設定してもらった。

4.2.2 回収および測定

照射が終了したガラス素子は、照射後できるだけ早くレターパック500で返送してもらうように依頼した。回収された素子は、返却後すぐにプレヒート処理を行い、1照射野ずつ（素子5本ずつ）、読取装置（Dose Ace）で測定した。

4.2.3 解析

測定結果から以下の式（1）を用いて誤差を求め、精度を確認した。

$$\frac{\text{測定値} - 200 \text{ (cGy)}}{200 \text{ (cGy)}} \times 100 \quad \dots \text{式 (1)}$$

5. 結果

5.1 電子線測定における精度確認

ガラス線量計の電子線測定の測定精度について、実測値と吸収線量（計算値）に対する誤差を Table.1 に示す。

Table.1 電子線測定の誤差（%）

	10×10	15×15	20×20
9MeV	-2.6	-4.2	-3.1
12MeV	-3.1	-7.0	-1.9

照射野 15×15 の 12MeV の誤差が、-7%と大きくなったが、それ以外は-3~-4%程度であり、全体の平均は、-3.65%であった。

次に線量依存性のグラフを Fig.12、Fig.13 に示す。

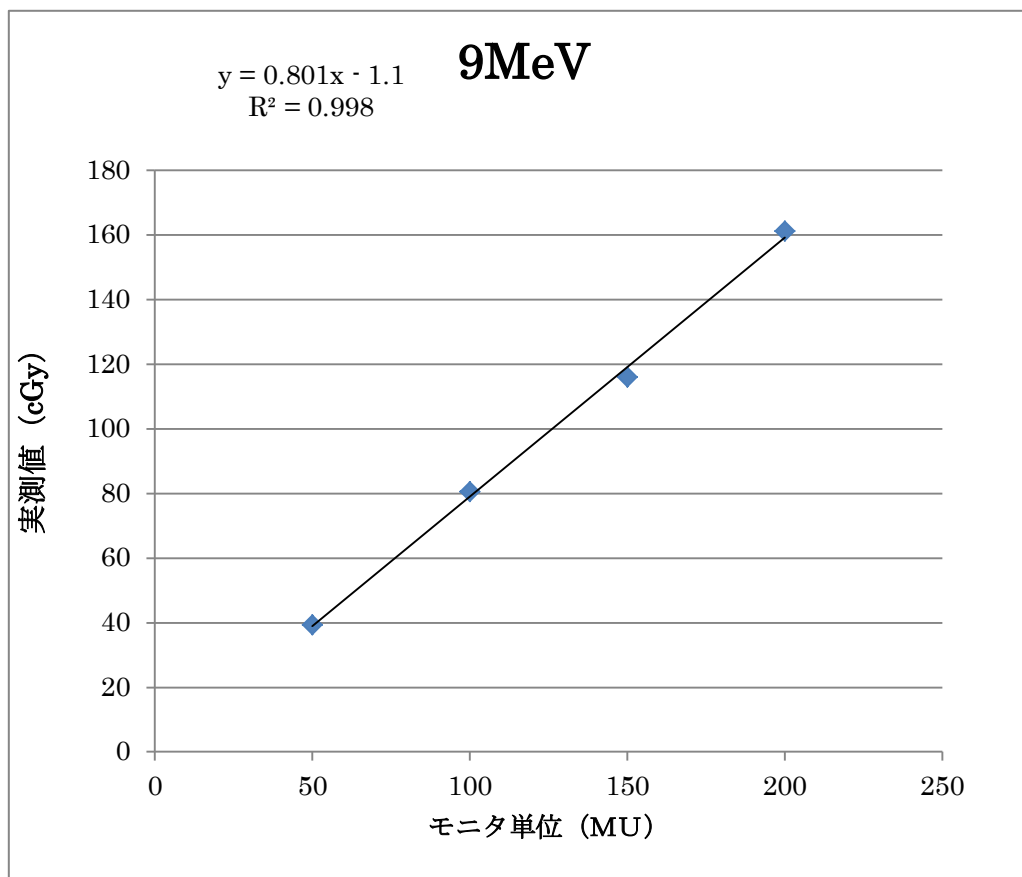


Fig.12 9MeV の線量依存性

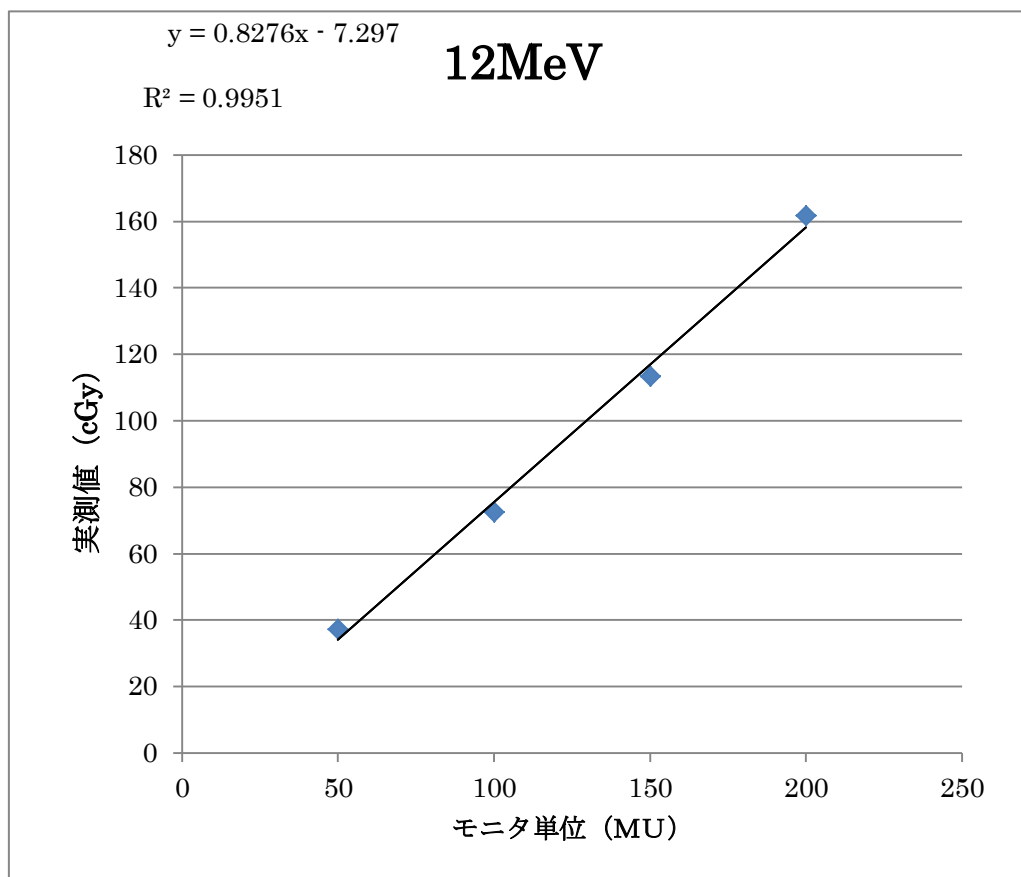


Fig.13 12MeV の線量依存性

また、各エネルギーの比例関係については、次の結果を得た。両エネルギー共に相関係数 0.998 以上を得た。

Table.2 測定結果の関係性

エネルギー	回帰式	決定係数 R^2	相関係数
9MeV	$y=0.801x-1.1$	0.998	0.999
12MeV	$y=0.8276x-7.297$	0.9951	0.998

5.2 郵送調査

郵送調査に協力いただいた5施設(9ビーム)の測定値から算出した誤差と測定深を、Table.3に示す。全体の平均値±標準偏差は、 $0.39 \pm 1.06\%$ であった。

Table.3 郵送調査における測定値から求めた誤差と測定深

誤差 (%)	病院A	病院B	病院C	病院D	病院E
6MeV	-1.6±0.8	0.2±1.0	0.7±0.8	-1.0±1.7	0.8±0.8
9MeV		1.2±0.8		-1.2±1.0	0.6±0.7
10MeV	3.8±1.5				

各施設の電子線R₅₀値と平均入射エネルギー及び設定深度、PDDをTable.4に示す。

Table.4 各施設の照射データ

	公称エネルギー	R ₅₀ (g/cm ²)	平均入射エネルギー	測定深	PDD(%)
病院A	6MeV	2.57	5.99	治療有効深	83.2
	10MeV	4.04	9.41	治療有効深	81.0
病院B	6MeV	2.33	5.43	基準深	100
	9MeV	3.57	8.32	基準深	100
病院C	9MeV	3.55	8.27	基準深	100
病院D	6MeV	2.3	5.36	校正深	100
	9MeV	3.5	8.16	校正深	100
病院E	6MeV	2.37	5.52	基準深	100
	9MeV	3.62	8.44	基準深	100

また、郵送調査の平均入射エネルギーと誤差を Fig.14 に示す。

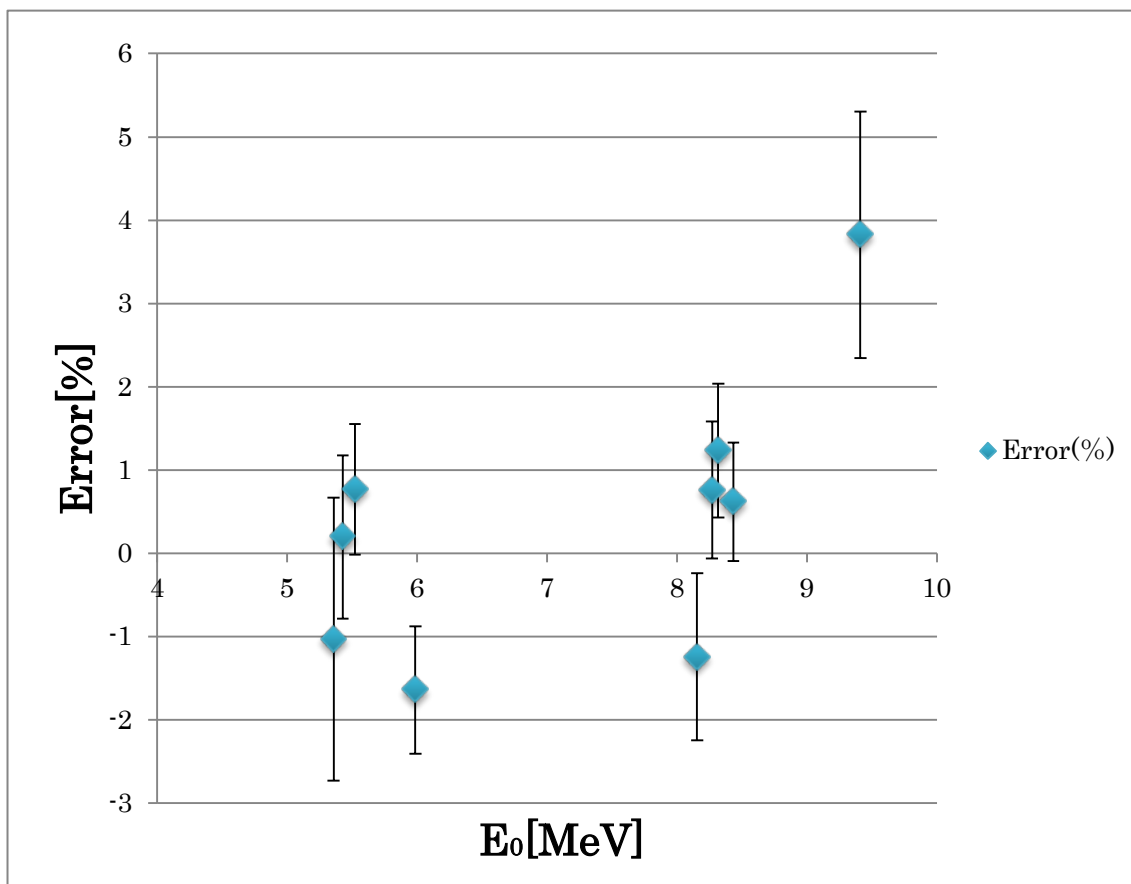


Fig.14 郵送調査の平均入射エネルギーと誤差

病院 A 以外は基準深または校正深での測定結果であり、誤差は概ね±1%程度であった。一方、病院 A のみ最高 3.8%となった。

5.3 不確かさの見積もり

平行平板形線量計の線量測定の不確かさの見積もりを Table.5 に示した。

Table.5 平行平板形線量計の線量測定の不確かさの見積もり ⁷⁾

物理量または手段	相対標準不確かさ (%)
線量校正における不確かさ	
ステップ 1：線量標準機関	
特定二次標準器の校正定数 ND,W	0.40
特定二次標準器による基準 γ 線場の決定	0.18
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の測定	0.27
ステップ 1 の合成不確かさ	0.52
ステップ 2：ユーザが使用する高エネルギー電子線	
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.4
基準条件の設定	0.6
モニタ設定値に対する表示値 M_{raw}	0.6
補正係数 k_i	0.5
線質補正係数 k_Q (計算値)	1.2
ステップ 1 の合成不確かさ	1.6
DW,Q の相対合成標準不確か (ステップ 1+2)	1.7

また、本実験での蛍光ガラス線量計の不確かさの見積もりを Table.5 に示した。

Table.5 本実験の不確かさの見積もり

標準不確かさ	
素子間の感度ばらつき (新品)	1.1%
読み取り再現性	0.3%
Position 間のばらつき	1.7%
合成標準不確かさ	2.0%
平行平板型電離箱線量計+ガラス線量計の相対合成標準不確かさ	2.7%
相対拡張標準不確かさ (包含係数 $K=2$)	5.3%

6. 考察

結果 5.1 の精度確認において、郵送調査と比較して誤差が大きくなってしまった理由の 1 つには中古の素子を使用したのではばらつきが目立ってしまったからだと考えられる。

また、照射野 $15 \times 15 \text{cm}^2, 12 \text{MeV}$ の誤差が大きくなってしまったのは、 $15 \times 15 \text{cm}^2$ の OPF の精度と、深さスケール係数が 10MeV までしかデータがなくエネルギーのミスマッチもあるかもしれない。さらに、測定深が線量勾配の急峻な治療有効深を用いたことがあげられる。

郵送調査では、未使用の素子を使用した事と水ファントムを使用し、測定深が病院 A 以外線量勾配の緩い基準深や校正深であった事で測定精度がおおよそ $\pm 1\%$ 前後になったと考えられる。

電子線計測の不確かさの見積もり値から、本実験での相対拡張標準不確かさは包含係数 2 で $\pm 5.3\%$ である。結果 5.1 から、最大誤差は -7.0% であったが他の誤差は $\pm 2 \sim 4\%$ 以内で全体の誤差の平均は -3.65% 以内であった。さらに、結果 5.2 の郵送調査の結果では最大誤差は 3.8% あったものの、誤差の平均は $0.39 \pm 1.06\%$ であった。すなわち結果 5.1、5.2 どちらにおいても十分に不確かさの範囲であった。

7. 結論

蛍光ガラス線量計の高エネルギー電子線測定における測定精度について、水等価ファントムを使用したことと線量勾配の強い治療有効深で測定したこと、また、以前に数回使用したガラス素子を使用したことにより、誤差が大きくなってしまったが、概ね相対拡張標準不確かさ $\pm 5.3\%$ の範囲内であった。

また、線量依存性の結果において相関係数は0.998以上であったので、線量依存性は十分であった。

郵送線量調査においても、測定値は相対拡張標準不確かさの範囲内であり、有用性が証明された。

結論として、蛍光ガラス線量計の電子線測定では、基準深や校正深で測定することで精度の高い郵送調査が行える事が分かった。

8. 謝辞

本卒業論文を作成するにあたり、多くのご指導、ご協力をいただきました大阪大学院医学系研究科医用物理講座松本光弘准教授に深く感謝いたします。

また、実験にご協力いただいた
大阪大学医学部附属病院放射線部 井ノ上技師、有村技師、圓尾技師、
郵送調査にご協力いただいた施設
兵庫医科大学病院
大阪府立急性期総合医療センター
大阪医科大学附属病院
大阪府立母子医療センター
近畿大学医学部附属病院
に深く感謝の意を示します。

9. 参考文献

- 1) 公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 治療用出力線量測定事業
(http://www.antm.or.jp/03_activities/03.html)
- 2) Feasibility study of glass dosimeter postal dosimetry audit of high-energy radiotherapy photon beams (Hideyuki Mizuno, Radiotherapy and Oncology 86 (2008) 258-263)
- 3) 蛍光ガラス線量計を用いた積算線量測定 (2) —熱ルミネセンス線量計との比較—
(山崎興樹, 江端英和, 大高敏裕, 笠原貢, 眞保隆博, 藤巻広司, 加藤健二, 殿内重政, 新潟県保健環境科学研究所年報 第16巻 2001)
- 4) 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班報告, 荒木不次男, 日本放射線技術学会雑誌 60(7), 939-947, 2002年
- 5) 株式会社千代田テクノル・旭硝子株式会社 AGC 電子カンパニー, 蛍光ガラス線量計・小型素子システム Dose Ace Dose Ace Xe 説明資料, 平成21年8月
- 6) 放射線治療における高エネルギー電子線の吸収線量測定マニュアル, 熊谷孝三
- 7) 外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法 (標準計測法 12), 日本医学物理学会 編