

# 卒業論文

題目：乳房撮影領域におけるガラス線量計による  
線量測定の有用性

大阪大学医学部保健学科放射線技術科学専攻  
(指導：医用物理工学講座 松本光弘 准教授)

05C13009 大森望未

(平成 28 年 11 月 29 日 提出)

## 要旨

【目的】蛍光ガラス線量計（GD-302M・GD-352M、以下 302M・352M）を用いて乳房撮影領域の吸収線量や深部量百分率（PDD）を測ることができるかどうかを、平行平板形電離箱線量計（以下電離箱）の吸収線量と比較することで検討した。また、吸収線量を比較する際の蛍光ガラス線量計の補正式を求めた。

【方法】10mm厚のアクリルファントムを4枚と20mm厚で中心部に電離箱やガラス線量計をはめこむことができるファントムを用意し、乳房撮影カセットホルダ上にファントムを設置した。測定はファントムの組合せを変えることで表面・10mm・20mm・30mm・40mmの深さについて、電離箱および302M・352Mで測定した。焦点-フィルタはMo-Mo、Mo-Rh、管電圧は26・28・30kVとした。

【結果】吸収線量の補正係数の近似式は  
Mo-Mo では 302M: $y=-19.486x^2+13.041x-1.4453$ 、  
352M: $y=210.59x^2-153.29x+30.693$ 、  
Mo-Rh では 302M: $y=27.007x^2-23.012x+5.5379$ 、  
352M: $y=-81.867x^2+67.375x-11.37$ 、  
となった。ここで  $x$ :半価層(mmAl)、 $y$ :補正係数とする。

【結論】蛍光ガラス線量計の吸収線量は補正式を考慮することで、電離箱との相違が Mo-Mo では 302M:0.00～0.99mGy (Ave0.40mGy)、352M:0.00～1.13 mGy (Ave0.42mGy)、Mo-Rh では 302M:0.00～0.88mGy (Ave0.34mGy)、352M:0.00～0.61mGy (Ave0.29mGy) となり、%誤差の平均が Mo-Mo の 302M:27%、352M:32%、Mo-Rh の 302M:24%、352M:24% となった。表面吸収線量は電離箱と誤差が僅かだった。しかし深部吸収線量では乖離が大きくなり、そのため表面線量と深部線量との比をとる PDD 評価は有用でない。深部吸収線量測定に関しては概ね 1mGy 以内で一致した。

【考察】蛍光ガラス線量計は線質依存性が大きく、特に 30keV 以下では急峻なレスポンス領域である。そのためファントムの深度が深くなるにつれ線質が硬化し、エネルギー補正が容易ではなく電離箱との乖離が起こったと推測される。深部吸収線量は概ねの線量測定は可能であったが、正確な PDD 測定には有用でなかった。

## 1. 序論

### 1. 1 背景

蛍光ガラス線量計は現在、個人被ばく線量測定や環境線量モニタリングなどに使われており、また近年医療における診療放射線の評価にも利用されている。先行研究では診断 X 線領域について低エネルギー領域（管電圧 50～130kV）での蛍光ガラス線量計の特性を検討していて、そこでは補正式を考慮することで蛍光ガラス線量計の使用は有効であるとなっている<sup>1)</sup>。

また Fig.1 に示す通り、旭硝子社によって示されている空気吸収線量に対するエネルギー特性では 30keV 以下では急峻なレスポンス領域となっている。24keV までの相対レスポンスは示されているが、約 15～16keV に相当する乳房撮影領域での相対レスポンスは示されていない。そこで蛍光ガラス線量計を用いて乳房撮影領域の線量を測定できるのか検討した。

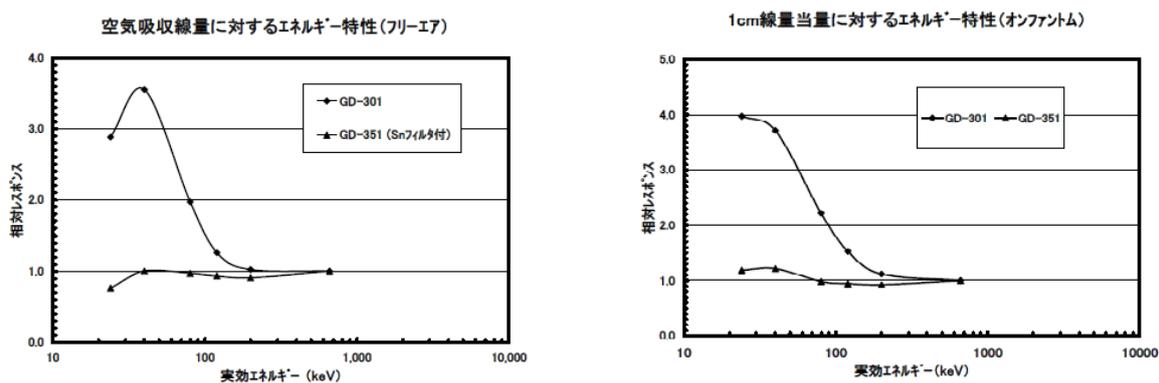


Fig.1 旭硝子社によって示されているエネルギー特性

## 1. 2 蛍光ガラス線量計の原理と特徴<sup>2)</sup>

蛍光ガラス線量計は銀活性リン酸塩ガラスが紫外線励起によってオレンジ色の蛍光を発する現象（ラジオホトルミネセンス：RPL）に基づく固体線量計である。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。

電離放射線が銀活性リン酸塩ガラスに照射されると、電子および正孔（ホール）がたたき出され、電子はガラス構造中の  $\text{Ag}^+$  に捕獲され、 $\text{Ag}^0$  となる。一方、正孔は一旦  $\text{PO}_4$  四面体に捕らえられるが、時間の経過とともに  $\text{Ag}^+$  へ移行し、より安定な  $\text{Ag}^{++}$  を形成する。これらの  $\text{Ag}^0$  および  $\text{Ag}^{++}$  がともにガラス中で RPL 中心（蛍光中心）となる。

線量の読み取りは線量計素子 GD-300 シリーズの読み取り用リーダーを用いた。低線量  $10 \mu\text{Gy}$  から  $10\text{Gy}$  まで測定可能で、校正は内部キャリブレーションガラスによって自動的に実行される。

本研究では旭硝子社製の蛍光ガラス線量計 GD-302M と GD-352M を用いた。302M と 352M の寸法は直径  $1.5\text{mm}$   $\phi$ 、長さ  $12\text{mm}$  である。蛍光ガラス線量計は素子自体にエネルギー依存性があり、低エネルギー領域で使用目的のものにはホルダ内部に低エネルギー補償フィルタである Sn フィルタが装着されている。302M は Sn フィルタの装着がなく、治療線量評価に適したもので、352M は Sn フィルタの装着があり、診断線量評価に適したものである。

ガラス線量計（GD-300 シリーズ）の特徴としては

- ①繰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。



Fig.2 ガラス素子の外観



Fig.3 線量計素子ホルダの外観

## 2. 目的

蛍光ガラス線量計を用いて、乳房撮影装置の吸収線量の測定および PDD の評価が可能かどうかを検討する。さらに電離箱吸収線量に変換するための補正式を求める。

### 3. 使用器具

- ・ 蛍光ガラス線量計・小型素子システム Dose Ace (旭ガラス株式会社)

線量計小型素子           GD-302M   GD-352M

- ・ 線量計リーダ           FGD-1000

- ・ 読取マガジン           FGD-M151

- ・ 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

- ・ 平行平板形電離箱線量計   PTW TN 34069 型

- ・ アクリルファントム(脂肪：乳腺=50：50 相当)   10mm 厚

- ・ ポリエチレンファントム(脂肪相当)   20mm 厚

- ・ 乳房撮影装置

SENOGRAPHE DMR(GE 横河メディカルシステム)

## 4. 方法

### 4. 1 線量直線性

X 線出力の安定性及び GD の線量依存性を調べるために表面線量直線性を測定した。乳房撮影カセットホルダ上にアクリルファントム 4 枚を置き、その上にポリエチレンファントムを置き、その中心部に 302M を 3 本はめ込んだ状態のものを設置し、照射を行った(Fig.4)。管電圧は 26・28・30kV とし、mAs 値を Mo-Mo の 26kV で 10・20・40・80・160、28kV で 8・16・32・63・125、28kV で 6.3・12.5・25・50・100、Mo-Rh の 26kV で 12.5・25・50・100・200、28kV で 10・20・40・80・160、30kV で 8・16・32・63・125 で行った。

### 4. 2 測定方法

#### 4. 2-1 電離箱線量計による測定

照射野は最大とし、焦点-カセットホルダ間を 640mm、焦点-ファントム表面間を 580mm とした。表面線量は乳房撮影カセットホルダ上にアクリルファントム(10mm 厚)4 枚を置き、一番上にポリエチレンファントム(20mm 厚)の中心部に電離箱をはめ込んだ状態のものを設置した状態で測定を行った。焦点-フィルタを Mo-Mo と Mo-Rh の二種類で交互に変化させながら管電圧を 26 kV・28 kV・30 kV と変化させ、表面吸収線量を測定した。mAs 値は常に 100 で固定した。その後ポリエチレンファントムを一段ずつ下げていき 10mm 深・20mm 深・30mm 深・40mm 深の吸収線量

を同様に測定した。

#### 4. 2-2 GD による測定

次に最初の状態に戻して 302M を 3 本 1 セットとし Fig.4 のようにポリエチレンファントムの中心部にセットした。この際、X 線入射方向による GD の測定値のばらつきを防ぐために、ID 番号の書いてある方が手前側になるように揃えた。電離箱と同様の手順で吸収線量を測定した。352M についても 3 本 1 セットとし 302M 同様に測定を行った。この一連の測定を日を変えて 2 日行った。

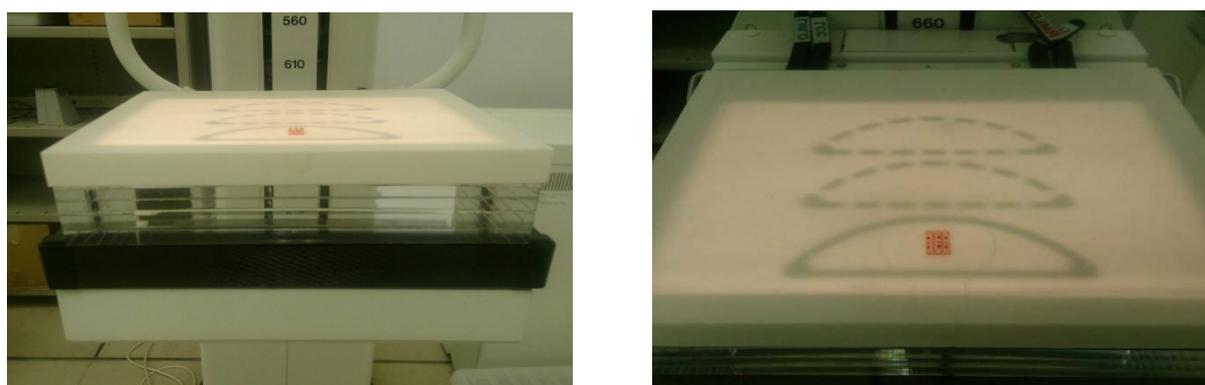


Fig.4 302M をはめこんだ際のアクリルフアントムとポリエチレンファントムの設置方法

#### 4. 3 GD の計測の手順

##### ①外観検査

表面に傷や汚れなどがあると正確な読み取りができないので、1 つずつ傷や汚れがないかどうか目視で確認する。傷があったものは使用せずに除き、汚れがあったも

のはアルコールシートでふき取った。

## ②アニーリング

ホルダから GD を取り出してアニール用マガジンにセットし、アニール用電気炉で 400°C 20 分の加熱処理を行った。処理後、40°C 以下になってからアニール用電気炉から取り出した。

## ③照射

GD をホルダに戻して照射した。

## ④プレヒート

GD はホルダにいたままプレヒートトレイにセットし、プレヒート用恒温器にて 70°C 30 分の加熱処理を行った。処理後、室温まで冷却してから恒温器から取り出した。

## ⑤読み取り

GD をホルダから取り出して、左側から順番に 20 本ずつ読取マガジンに収納し、読取マガジンをリーダにセットして照射後の線量を読み取った。読み取りは三回行い、その平均値を 1 回目の測定線量とした。また、読み取り位置によるばらつきを考慮するため、今度は右側から順番に収納し同様に、平均値から 2 回目の線量を測定した。

測定を 2 日行ったので計 4 回の読み取りの平均値を最終測定線量とした。

#### 4. 4 電離箱線量計の計算式

電離箱線量計で測定した X 線空中電離電荷量を吸収線量に変換する際、次式を用いて吸収線量を算出した。

$$D=Q \times N \times 2.58 \times 10^{-4} \times 33.97 \times k_1$$

D : 吸収線量[Gy]

Q : 測定電荷量[C]

N : 線量計の校正定数( $5.125 \times 10^8$ [R/C])

1[R]= $2.58 \times 10^{-4}$ [C/kg]

Wair 値 : 33.97[J/C]

$k_1$  : 大気補正係数

$$k_1 = [(273.2+T) \times P_0] / [(273.2+T_0) \times P]$$

T,P : 測定時気温[°C],気圧[hPa]

T<sub>0</sub>,P<sub>0</sub> : 線量計校正時の気温[°C],気圧[hPa]

#### 4. 5 GD の補正係数の算出方法

Mo-Mo・Mo-Rh のそれぞれにおいて条件毎に

(電離箱線量計の吸収線量) / (GD の吸収線量)を求め、その値を補正係数とした。

## 5. 結果

## 5. 1 線量直線性

302M を用いた表面線量直線性の結果を Fig.5 に示す。

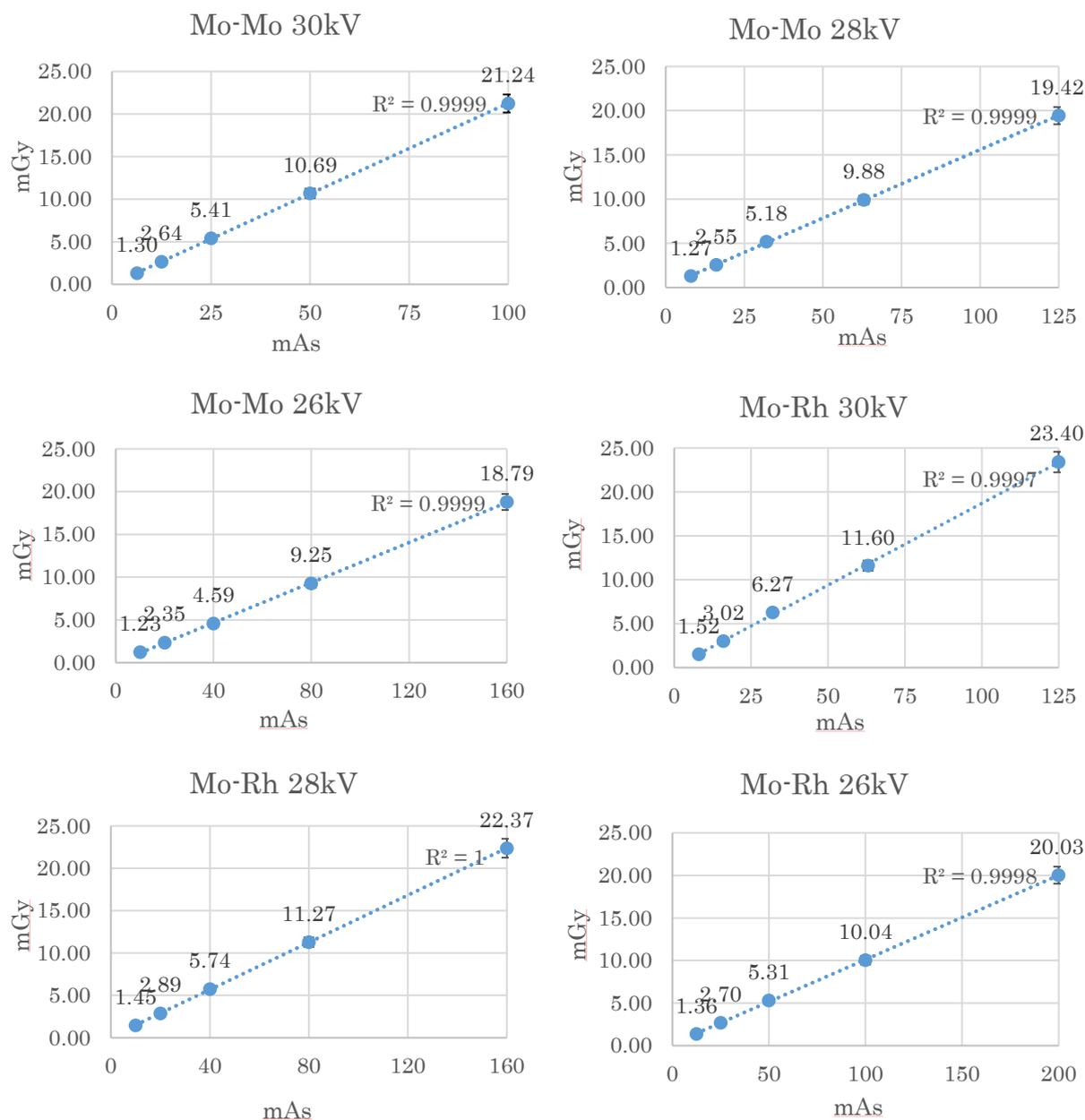


Fig.5 302M の表面線量直線性のグラフ

線量直線性の結果は決定係数が Mo-Mo、Mo-Rh とともに 0.999 以上であったことから X 線出力及び GD の線量依存性は mAs 値に対して直線性を示した。

## 5. 2 吸収線量の測定

電離箱・302M・352M を用いた表面・10mm・20mm・30mm・40mm深での吸収線量を Table.1 に示す。

Table.1 吸収線量の結果

Mo-Mo	電離箱	302M	352M	Mo-Rh	電離箱	302M	352M		
深度(mm)	線量(mGy)			深度(mm)	線量(mGy)				
26kV	0	8.692	11.801	2.922	26kV	0	6.814	10.367	2.750
	10	3.138	5.348	1.285		10	2.782	5.048	1.274
	20	1.408	2.475	0.642		20	1.347	2.624	0.638
	30	0.623	1.139	0.315		30	0.638	1.297	0.346
	40	0.282	0.577	0.180		40	0.308	0.687	0.199
28kV	0	11.434	15.750	4.075	28kV	0	9.141	14.343	3.675
	10	4.365	7.374	1.812		10	3.899	7.173	1.785
	20	1.956	3.518	0.899		20	1.872	3.711	0.924
	30	0.897	1.707	0.440		30	0.916	1.872	0.493
	40	0.426	0.880	0.250		40	0.458	0.952	0.272
30kV	0	14.512	20.733	5.110	30kV	0	11.720	18.351	4.797
	10	5.795	9.653	2.438		10	5.155	9.443	2.358
	20	2.653	4.824	1.213		20	2.519	4.969	1.254
	30	1.244	2.357	0.610		30	1.244	2.582	0.649
	40	0.599	1.217	0.314		40	0.629	1.340	0.351

GD はそれぞれ違った線量依存性がある(Fig.1)ため、電離箱に対して 302M は大きく 352M は小さい線量評価となった。

## 5. 3 GD の補正係数の算出

電離箱に対する 302M・352M の補正係数を求めた。これらを Table.2 に示す。また SENOGRAPHE DMR の各管電圧に対する半価層を Table.3 に示す。

Table.2 302M・352Mの各深さにおける補正係数

Mo-Mo		補正係数		Mo-Rh		補正係数	
深度(mm)		302M	352M	深度(mm)		302M	352M
26kV	0	0.7366	2.975	26kV	0	0.6572	2.477
	10	0.5868	2.442		10	0.5511	2.183
	20	0.5688	2.194		20	0.5134	2.110
	30	0.5470	1.976		30	0.4921	1.847
	40	0.4898	1.565		40	0.4485	1.551
28kV	0	0.7260	2.806	28kV	0	0.6373	2.488
	10	0.5919	2.410		10	0.5436	2.184
	20	0.5561	2.177		20	0.5043	2.025
	30	0.5254	2.035		30	0.4893	1.857
	40	0.4836	1.706		40	0.4813	1.685
30kV	0	0.6999	2.840	30kV	0	0.6387	2.443
	10	0.6003	2.377		10	0.5459	2.186
	20	0.5499	2.186		20	0.5070	2.009
	30	0.5277	2.040		30	0.4817	1.916
	40	0.4922	1.910		40	0.4691	1.789

Table.3 各管電圧に対する半価層

kV	Mo-Mo	Mo-Rh
	HVL	
26	15.2	16.0
28	15.5	16.2
30	15.7	16.4

表面線量における補正係数をもとに Fig.6 より求めた補正関数を下に示す。

Mo-Mo では 302M:  $y=-19.486x^2+13.041x-1.4453$ 、

352M:  $y=210.59x^2-153.29x+30.693$ 、

Mo-Rh では 302M:  $y=27.007x^2-23.012x+5.5379$ 、

352M:  $y=-81.867x^2+67.375x-11.37$ 、

となった。ここで x:半価層(mmAl)、y:補正係数とする。

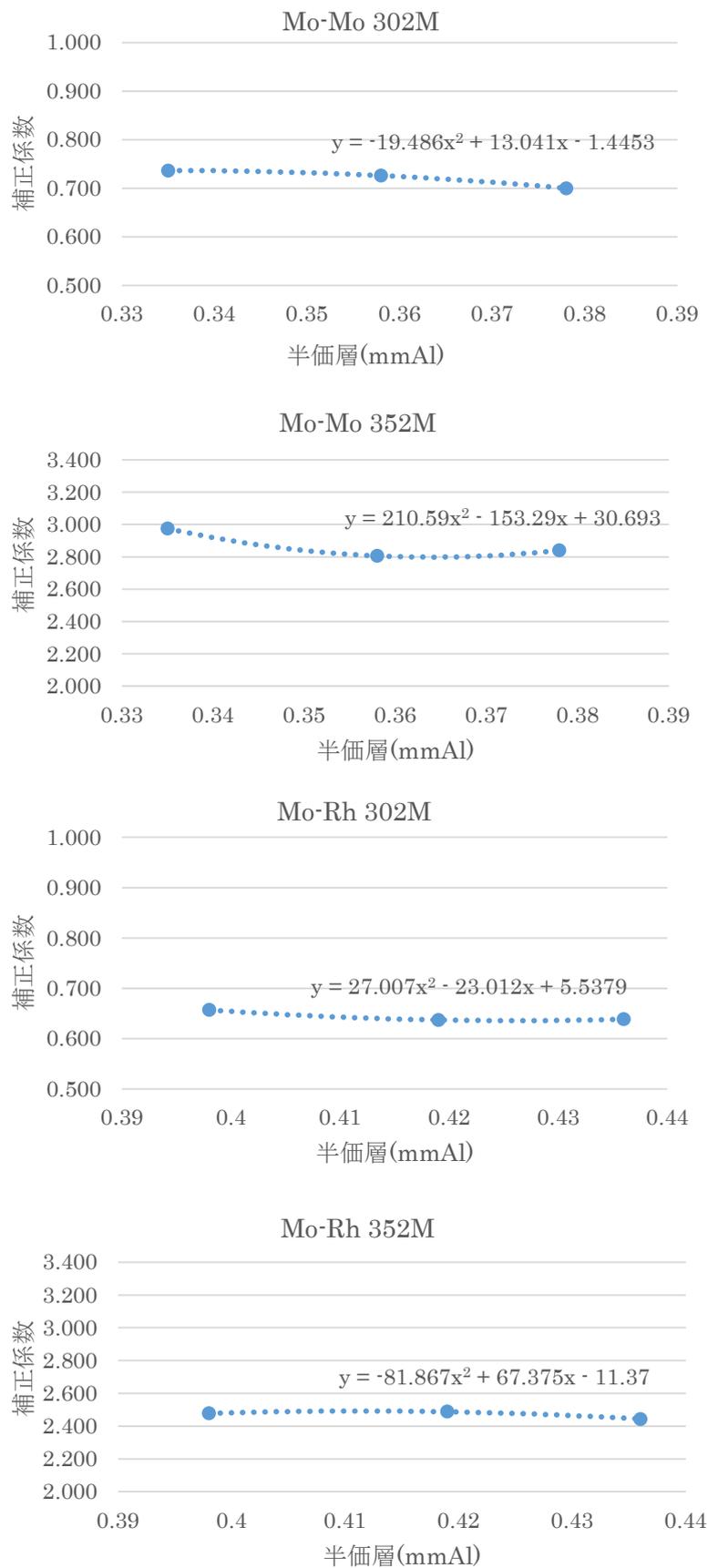


Fig.6 補正係数の近似曲線(補正関数)

## 5. 4 GD の補正值の検討

これらの補正関数からもとめた補正係数を考慮した後の吸収線量の結果と、またその際の電離箱との誤差の割合を Table.4 に示す。

Table.4 吸収線量（補正後）と電離箱との誤差

Mo-Mo	電離箱	302M	352M	302M	352M	302M	352M	
深度(mm)	線量(mGy)			誤差(%)		$\Delta$ mGy		
26kV	0	8.692	8.693	8.691	0%	0%	0.000	-0.001
	10	3.138	3.939	3.821	26%	22%	0.801	0.683
	20	1.408	1.823	1.909	30%	36%	0.415	0.501
	30	0.623	0.839	0.938	35%	51%	0.216	0.315
	40	0.282	0.425	0.537	50%	90%	0.142	0.254
28kV	0	11.434	11.434	11.432	0%	0%	0.000	-0.002
	10	4.365	5.354	5.082	23%	16%	0.988	0.717
	20	1.956	2.554	2.521	31%	29%	0.598	0.565
	30	0.897	1.239	1.236	38%	38%	0.342	0.339
	40	0.426	0.639	0.700	50%	64%	0.213	0.274
30kV	0	14.512	14.512	14.509	0%	0%	0.000	-0.002
	10	5.795	6.757	6.922	17%	19%	0.962	1.127
	20	2.653	3.377	3.445	27%	30%	0.724	0.793
	30	1.244	1.650	1.731	33%	39%	0.406	0.487
	40	0.599	0.852	0.891	42%	49%	0.253	0.291
Mo-Rh	電離箱	302M	352M	302M	352M	302M	352M	
深度(mm)	線量(mGy)			誤差(%)		$\Delta$ mGy		
26kV	0	6.814	6.813	6.813	0%	0%	-0.001	0.000
	10	2.782	3.317	3.157	19%	13%	0.535	0.375
	20	1.347	1.724	1.582	28%	17%	0.377	0.235
	30	0.638	0.852	0.856	34%	34%	0.214	0.218
	40	0.308	0.481	0.564	56%	83%	0.173	0.256
28kV	0	9.141	9.140	9.140	0%	0%	-0.001	-0.001
	10	3.899	4.571	4.440	17%	14%	0.672	0.541
	20	1.872	2.365	2.299	26%	23%	0.493	0.427
	30	0.916	1.193	1.227	30%	34%	0.277	0.311
	40	0.458	0.606	0.676	32%	48%	0.148	0.218
30kV	0	11.720	11.719	11.719	0%	0%	-0.001	-0.001
	10	5.155	6.030	5.760	17%	12%	0.875	0.605
	20	2.519	3.173	3.064	26%	22%	0.654	0.545
	30	1.244	1.649	1.586	33%	28%	0.405	0.342
	40	0.629	0.856	0.859	36%	37%	0.227	0.230
平均値 $\pm$ SD							0.36 $\pm$ 0.28(mGy)	

結果 5. 3 で求めた GD の補正関数は各々の表面線量からの算出であるため、当然深部での吸収線量で電離箱との一致度が低下した。

電離箱の吸収線量と補正後のGDの吸収線量との誤差を Fig.7 に示す。

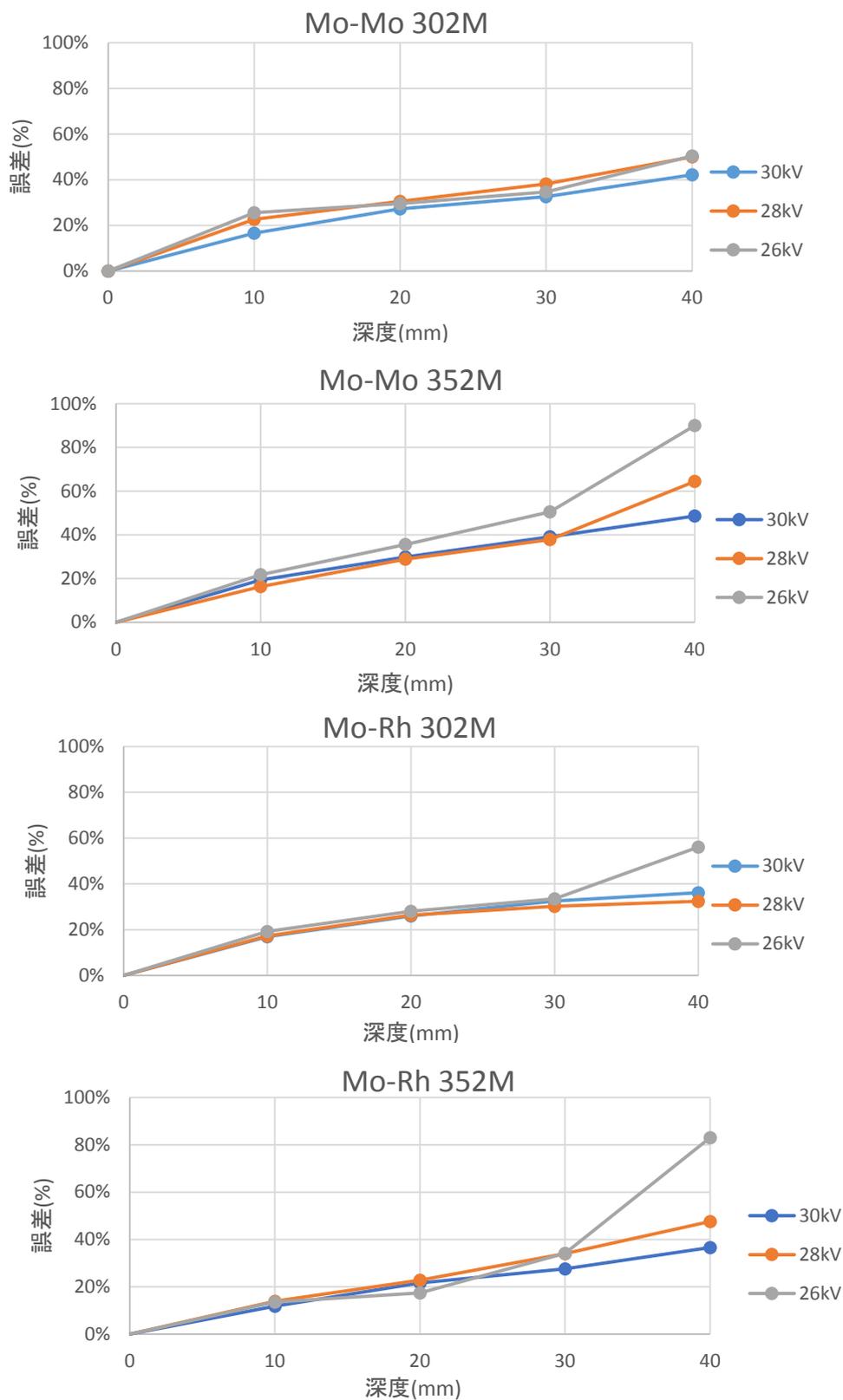


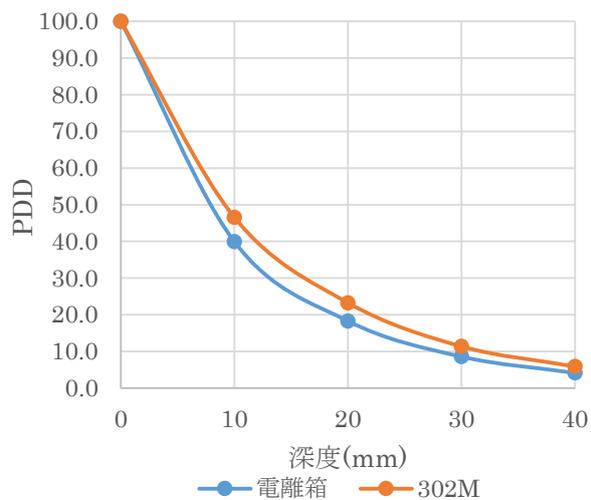
Fig.7 電離箱との誤差のグラフ

電離箱線量計、GD 共に不確かさを 10%と見積もると表面・10mm深の吸収線量は不確かさの範囲内に収まっているがそれより深部では乖離が大きく、特に 40mm深での誤差(%)の乖離が大きくなった。しかしながら吸収線量差は全ての測定において、深度が深くなるにつれ、電離箱との線量差は小さくなった。

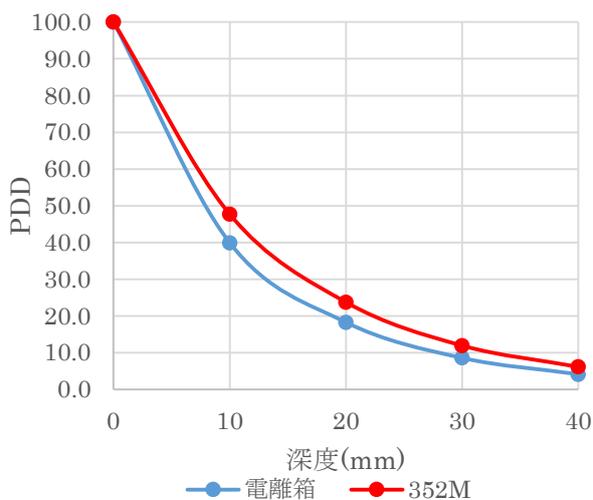
## 5. 5 PDD の評価

Table.4 のデータを用い、PDD カーブを Fig.8 に示す。

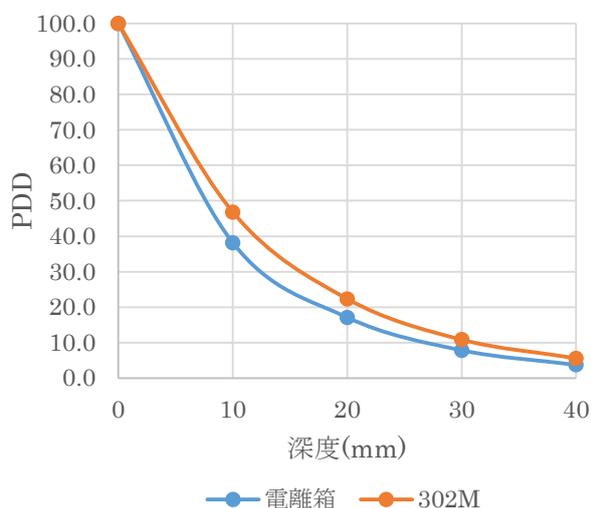
Mo-Mo 30kV



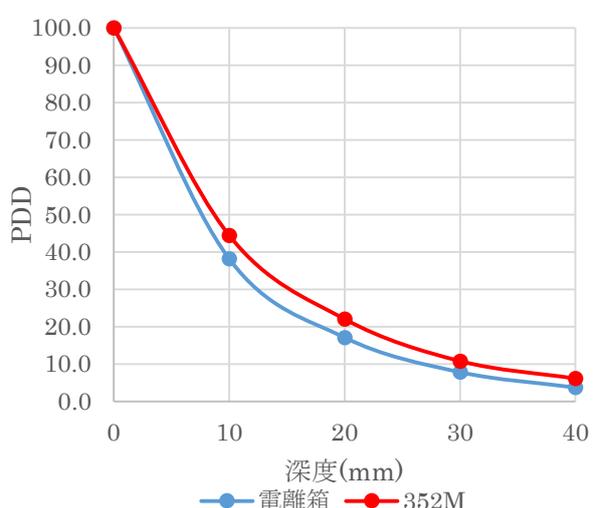
Mo-Mo 30kV



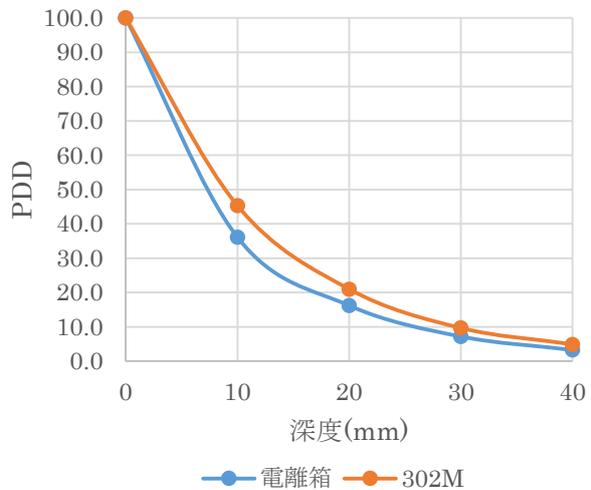
Mo-Mo 28kV



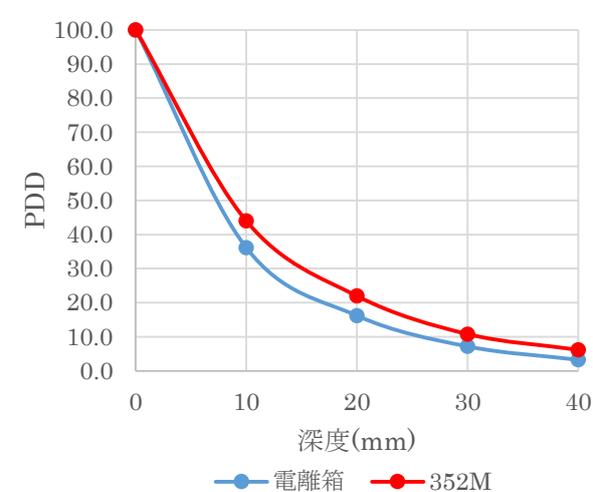
Mo-Mo 28kV



Mo-Mo 26kV



Mo-Mo 26kV



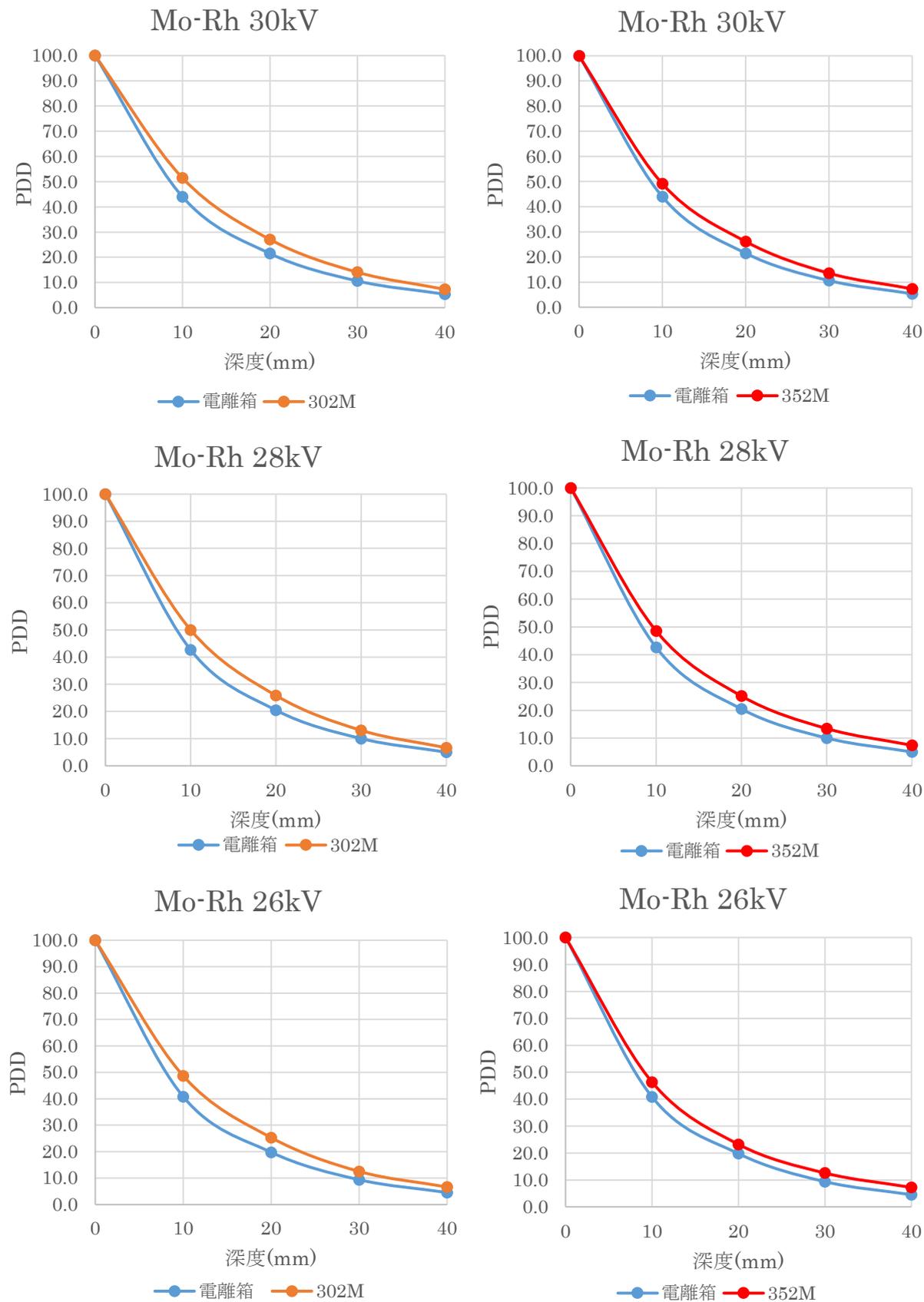


Fig.8 PDD のグラフ

Fig.8 から 302M も 352M も PDD が過大評価となった。各深度での電離箱と GD

との PDD の誤差を Fig.9 に示す。

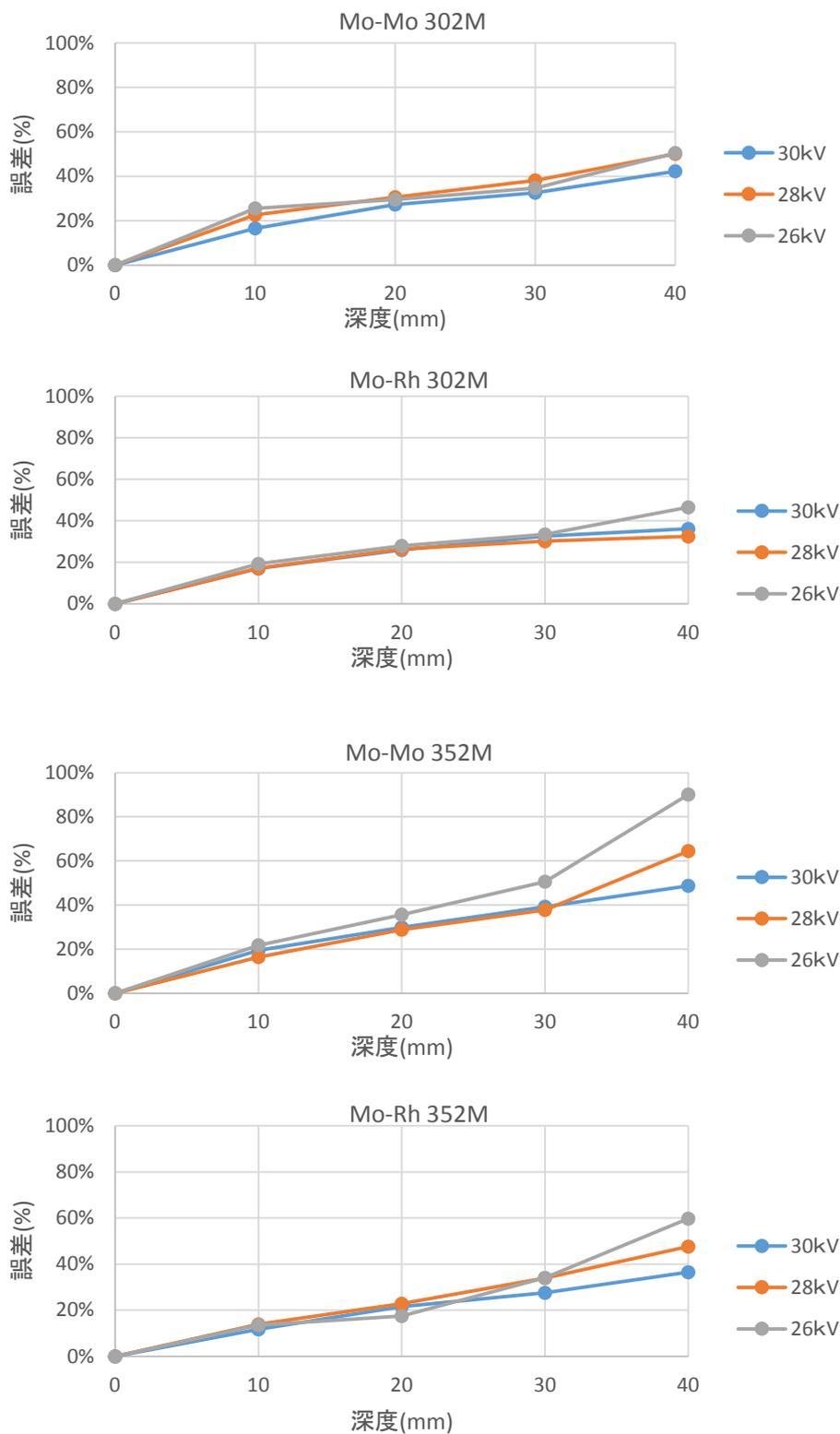
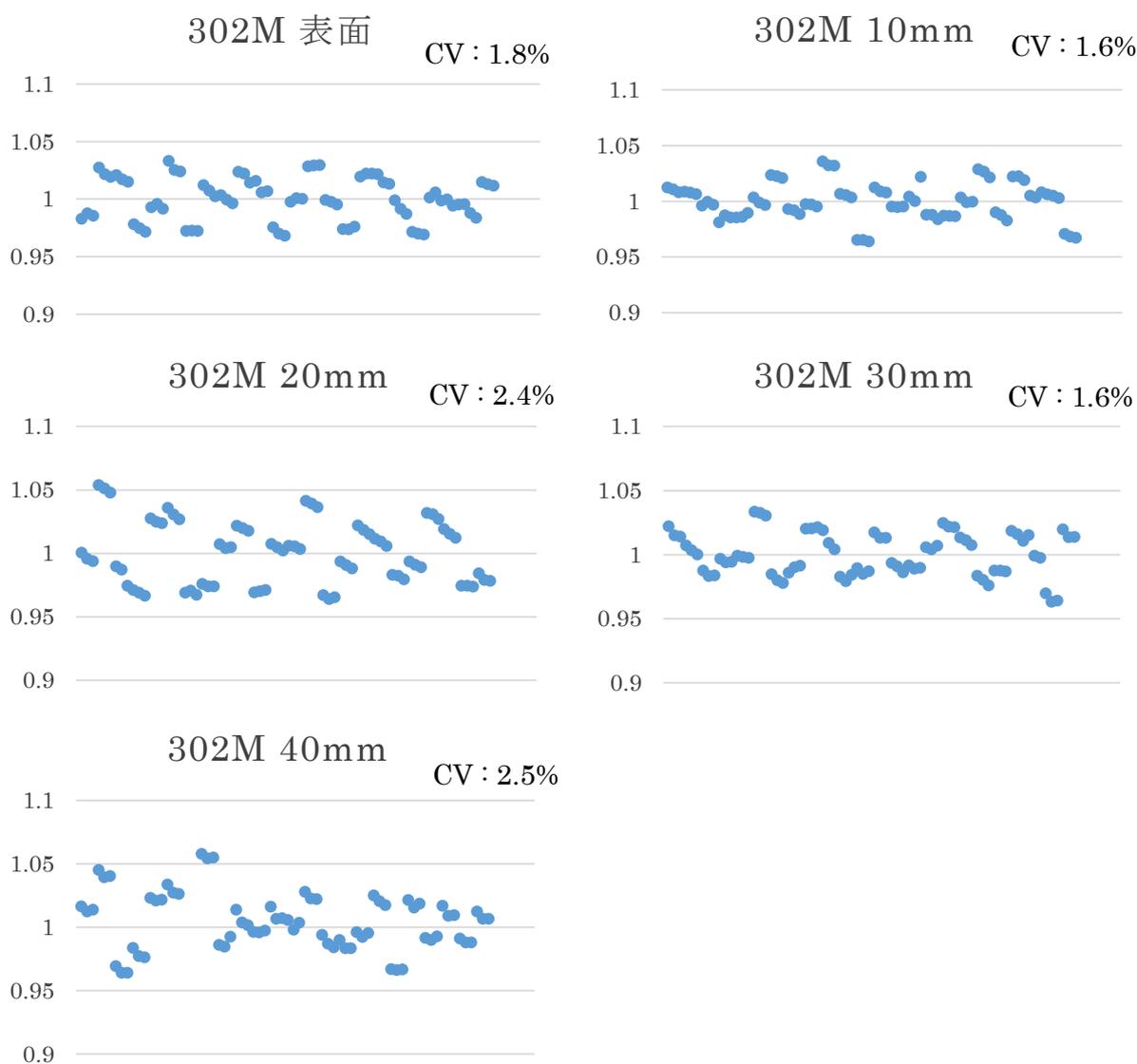


Fig.9 PDD の誤差のグラフ

Fig.7 に示すように深部での乖離が大きかったことから表面線量と深部線量との比をとる PDD は深部での誤差が大きくなってしまい、PDD 評価は正確にできなかった。

## 5. 6 GD の素子のばらつき評価

302M・352M の素子のばらつきを Fig.10 に示す。ここではそれぞれの照射条件での平均値を 1 に正規化し、Mo-Mo と Mo-Rh はまとめてグラフに示した。



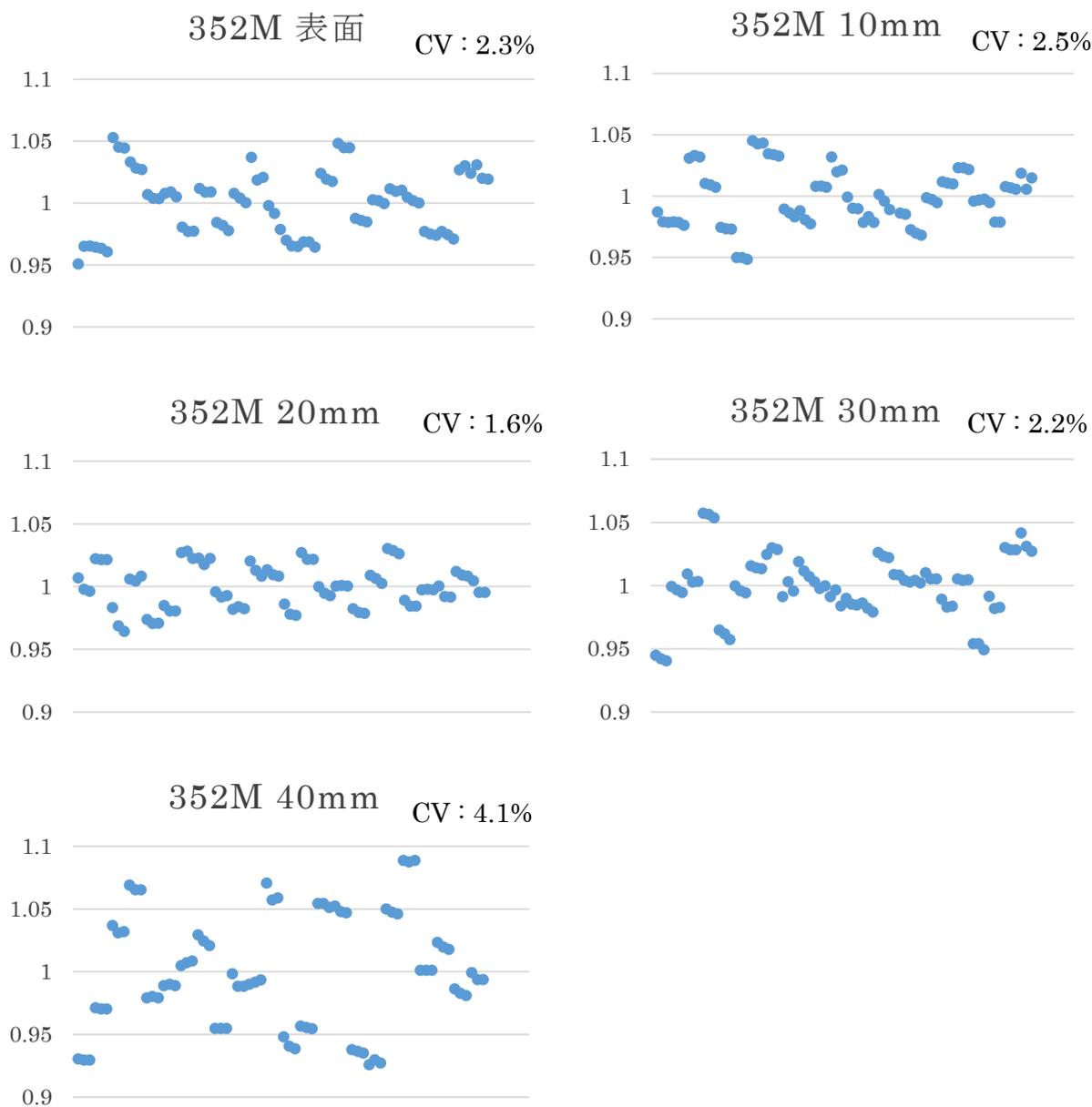


Fig.10 302M・352M のばらつきと変動係数

302M・352M の深度によるばらつきの分布は±5%以内であり、変動係数(CV)も概ね 3%以下であった(352M 40mm 除く)。素子によるばらつきの違いは 302M(平均 CV:1.98%)と比べると若干ではあるが 352M(平均 CV:2.54%)のほうがばらつきが大きかった。これは引用文献でも同様の結果となっているがその差はわずか(0.56%)であった。<sup>3)</sup>

最後に旭硝子社によって示されているエネルギー特性に今回の実験データから求めた相対レスポンスを書き加えたグラフを Fig.11 に示す。

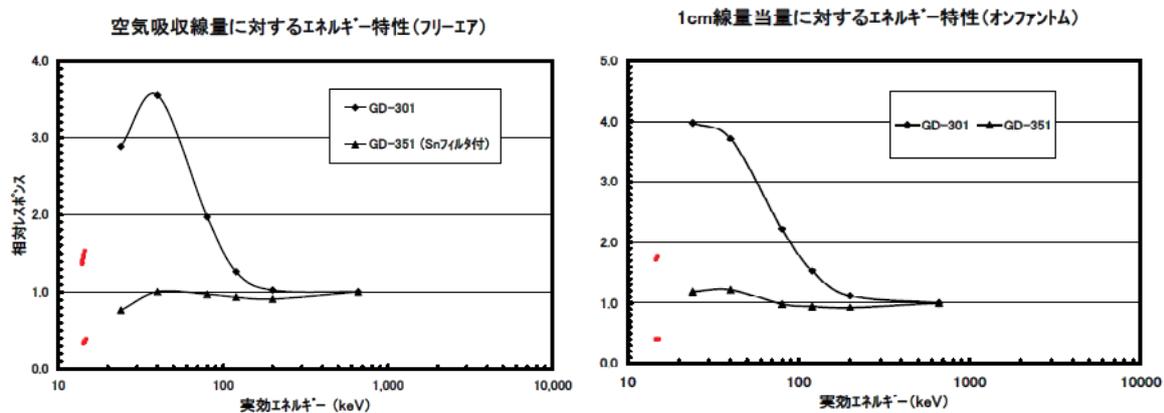


Fig.11 旭硝子社のデータに今回の実験データを加えたグラフ

## 7. 考察

GD は線質依存性が大きく、特に 30keV 以下では急峻なレスポンス領域である。管電圧が高くなる、あるいはファントムの深度が深くなると線質が硬化し、補正係数に変化が見られる。管電圧の変化による線質の硬化は補正係数を考慮することで補正できたが、ファントムの深度が深くなることによる線質の硬化はエネルギー補正が容易ではなく、補正係数の考慮だけでは完全な補正ができずに電離箱との乖離が起こったと推測される。深部吸収線量の評価という点では概ね 1 mGy 以内、平均: 0.36mGy、SD: 0.28mGy(Table.4)という線量で一致したが、深部での線量乖離割合(誤差%)が大ききことから正確な PDD 評価には有用でなかった。また旭硝子社によって示されたデータと今回の実験データの比較から、30keV 以下で急峻となった相対レスポンスは、乳房撮影領域でも急峻となることが推測された。

## 8. 結論

乳房撮影領域では補正係数の考慮により 302M・352M のどちらでも表面吸収線量を測定することが可能である。深部での線量乖離が大きくなるが概ねの吸収線量測定であれば可能。PDD 評価は深部での乖離が大きくなるので有用ではないという結果となった。

## 9. 引用文献

- 1) 石川陽子 蛍光ガラス線量計小型素子システムにおける低エネルギー用素子 (Sn フィルタ装着) の特性について
- 2) 旭硝子株式会社 蛍光ガラス線量計・小型素子システム Dose Ace 説明資料
- 3) 河原田泰尋 阿部真衣子 小澤慶子 小野絵理 根岸徹 長島宏幸 五十嵐博、  
X 線診断領域におけるガラス線量計 (GD-352M) の諸特性 群馬県立県民健康科学大学紀要 第3巻 11~19 2008