

卒業論文

題目:乳房トモシンセシスと従来法との平均乳腺線量(MGD)の比較

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)

05C15008 尾崎 史歩

(平成 30 年 11 月 22 日 提出)

要旨

[目的]

今回、Mo/Mo,Rh/Ag 仕様(GE Healthcare 社製 SENO PRISTINA 3D)、W/AI 仕様(FUJIFILM 社製 Amulet Innovality)の装置を使用する機会があったので、従来のマンモグラフィ(GE Healthcare 社製 SENOGRAPHE DMR)と乳房トモシンセシスにおける平均乳腺線量(Mean Glandular Dose: 以下、MGD)をガラス線量計を用いて比較検討した。

[方法]

先行研究で1回の照射のみでMGD測定が可能だと確認できている自作MGDファントム(PMMA製、190×247mm、5mm厚、8枚)を用い、PMMA厚20mm、30mm、40mmにおいてMGDを実測した(以下、本法を1回曝射法と呼ぶ)。GE社製 senographe pristinaとFUJIFILM社製 Amulet Innovalityで1回曝射法により行った。管電圧28、30、32kV、32mAs一定、PMMA厚20、30、40mmで撮影条件固定および自動露出機構(Auto Exposure Control: 以下、AEC)モードで測定した。

[結果]

単純撮影と断層撮影のMGDを比較した結果、全てのターゲット/フィルタの組み合わせにおいて単純撮影の方が断層撮影より高くなり、その差はMo/Moでは平均2%、Rh/Agでは平均6%、W/AIでは平均4%であった。
次に、AECモードで測定した結果は、Mo/Moでは単純撮影の方が約4.7%高く、Rh/Agでは約4.3%、W/AIでは約2.3%断層撮影の方が高くなった。

[考察]

撮影条件を固定した実験系においては、2Dと3DのMGDを比較した結果、全てのターゲット/フィルタの組み合わせにおいて単純撮影の方が値が大きくなったが差は僅差であり、ガラス線量計の不確かさ(±7%)を考慮すると測定誤差範囲内の変動と考えられる。
AECモードでも全てのターゲット/フィルタの組み合わせにおいて不確かさ(±7%)の範囲内で一致した。

[結論]

今回は2社による比較実験であったが、撮影条件を固定した実験系、AEC使用時ともに2D,3Dの線量差は不確かさ(±7%)の範囲内であり、差は認められなかった。

1.序論

1.1 背景

乳房デジタルトモシンセシス(Digital Breast Tomosynthesis: 以下、DBT)は、デジタルマンモグラフィと比較して、スクリーニング検出尺度において有意な改善を示しているが、DBTをマンモグラフィと組み合わせて使用することによって生じる被曝量の増加、読影時間の延長および画像容量の増加などの懸念点が提起されている¹⁾²⁾。DBTによる放射線量についてはいくつかの装置で比較されているが、メーカーにより特色がある¹⁾。

1.2 蛍光ガラス線量計の原理と特徴

蛍光ガラス線量計は銀活性リン酸塩ガラスに電離放射線を照射すると、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。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(図 1)。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、何度でも繰り返し読み取りができる真の積算型固体線量計である。⁴⁾

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)がたたき出され、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(図 2)。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。⁴⁾

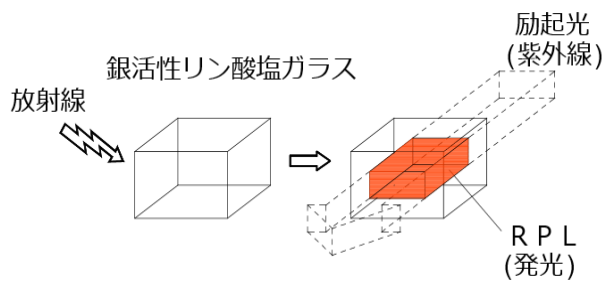


図 1 RPL の原理⁴⁾

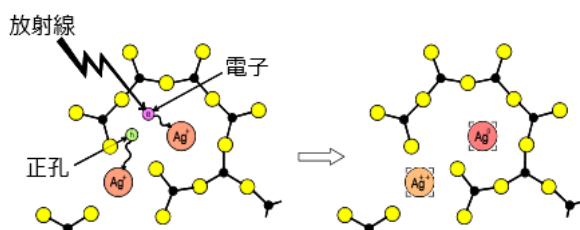
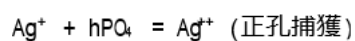
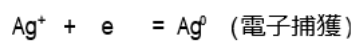


図 2 RPL 中心の形成⁴⁾

ガラス線量計(GD-300 シリーズ)の特徴としては

- ①繰り返し読取が可能
- 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。³⁾

1.2.1 蛍光ガラス線量計の使用手順

図 3 にガラス素子の外観を示す。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行えない。使用前に素子の欠損・汚れ・白曇りを確認し(外観検査)、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°Cで 20 分間のアニール処理を行った。⁴⁾

その後照射を行い、照射後は再び外観検査を行った。放射線が照射されたガラス素子には RPL 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った。本研究では 70°Cで 40 分間のプレヒート処理を行い、読み取り装置(Dose Ace)で測定した。保管はデジケーター内で行った。⁴⁾



図 3 ガラス素子の外観⁴⁾



図 4 線量計素子ホルダの外観⁴⁾

2.目的

今回、トモシンセシス撮影が可能な Mo/Mo,Rh/Ag 仕様(GE Healthcare 社製 SENO PRISTINA 3D)、W/AI 仕様(FUJIFILM 社製 Amulet Innovality)の装置を使用する機会があったので、従来のマンモグラフィ(GE Healthcare 社製 SENOGRAPHE DMR)単純撮影法(以下、2D)と乳房トモシンセシス(以下、3D)における平均乳腺線量(Mean Glandular Dose: 以下、MGD)をガラス線量計を用いて比較検討した。先行研究³⁾より蛍光ガラス線量計を用いて一回の曝射のみで MGD 測定が可能な自作 MGD ファントム(PMMA 製,190×247mm,5mm 厚,8 枚)を使用し、PMMA 厚 20mm,30mm,40mm において MGD を実測した(以下、本法を一回曝射法と呼ぶ)。

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
 - ・線量計リーダー FGD-1000
 - ・読取マガジン FGD-M151
 - ・アニールマガジン FGD-C101
 - ・アニール電気炉 NEW-1CT
 - ・プレヒート用恒温器 DKN-302
 - ・プレヒートトレイ FGD-C102
 - ・平行平板形電離箱線量計 PTW TN 34069 型
 - ・PMMA ファントム(乳房相当、 $\mu/\rho:1.101$) (190×247×10mm,2 枚, 190×247×5mm,1 枚)
- (*Breast tissue(ICRU-44) $\mu/\rho:1.378$ at 15keV)
- ・乳房撮影装置 GE 社製 senographe pristina

FUJIFILM 社製 Amulet Innovality

- ・PMMA ファントム(190×247×5mm,8 枚)

表 1 各装置の仕様

ターゲット/フィルタ	仕様	グリッド	3D の振角	FPD
Mo/Mo	GE 社製	11:1	$\pm 12^\circ$ (24°)	間接変換方式
Rh/Ag		11:1	$\pm 12^\circ$ (24°)	間接変換方式
W/Al	FUJIFILM 社製	6:1	$\pm 20^\circ$ (40°)	直接変換方式

4.蛍光ガラス線量計(GD)の計測手順

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した。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°C20 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 はホルダに入れたままプレヒートトレーにセットし、プレヒート用恒温器にて 70°C30 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2回行い、その平均値を測定線量とした。

5.方法

一回曝射法による PMMA ファントムを図 5 に示す。

従来 MGD を実測するには電離箱線量計を用いて、深さごとに電離箱線量計を設置して測定しなければならず、X線管球負荷やX線出力誤差が否めない。そこで、一回曝射で MGD が計測できれば、それらが軽減できる。

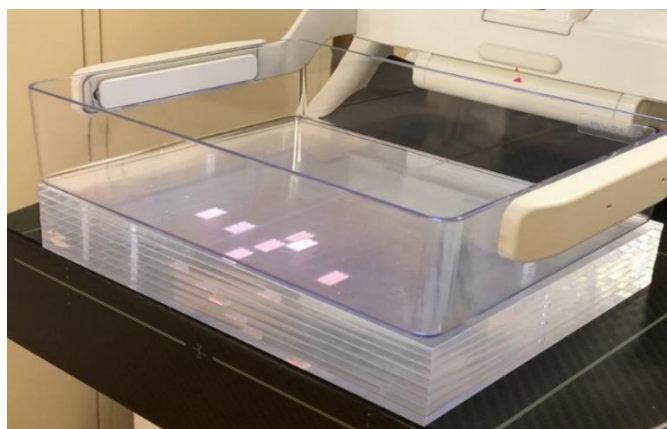


図 5 PMMA ファントムの外観

5.1 一回曝射法

PMMA 厚 20mm から 40mm まで 10mm 間隔、管電圧は 28,30,32kV、32mAs 一定、ターゲット/フィルタは Mo/Mo、Rh/Ag、W/Al の 3 種類で各層の吸収線量をガラス線量計にて測定し、2D,3D における MGD を求めた。ここで、ファントムの各層の組み合わせを 3 パターン無作為に変更した各組合せにおいて 1 回ずつ照射をした。各深さにおいて 3 本のガラス線量計(以下、GD)平均値を測定値とした。各測定において圧迫板をファントムぎりぎりまで降ろし散乱線を考慮した(図 6)。

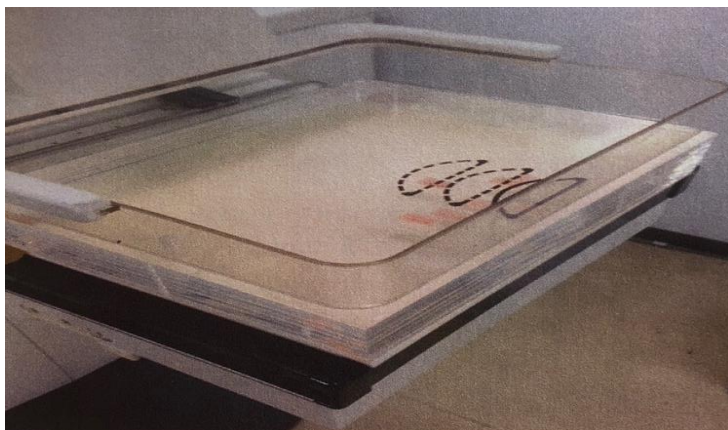


図6 一回曝射法測定時の外観

5.2 ガラス線量計(GD-302M)における線質補正係数

ガラス線量計(GD-302M)は低エネルギー領域の線質依存性が大きいため、相対レスポンス⁵⁾(図7)の補正を必要とする。さらに25keV以下はデータがないため、電離箱線量計との比較の上、補正係数を求めた。Mo/Moに関しては平成28年度卒業研究(大森望未)⁵⁾より求め0.71360、Rh/AgとW/AIに関しては空気カーマを5本の素子平均吸収線量(図8)で割って求めた結果、それぞれ0.52171、0.53531となった。

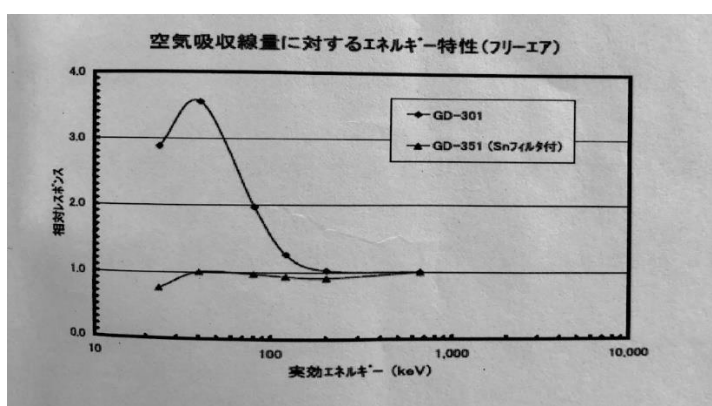


図7 旭硝子株式会社によって示されている相対レスポンス



図 8 空気カーマ測定時の外観(GD)

なお、電離箱線量計で測定した空中電離電荷量を吸収線量に変換する際、次式を用いて空気カーマを算出した。

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

K: 空気カーマ[Gy]

Q: 測定電荷量[C]

N: 線量計の校正定数(5.125×10^8 [R/C])

1[R]= 2.58×10^{-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_0, P_0 : 線量計校正時の気温[°C],気圧[hPa]

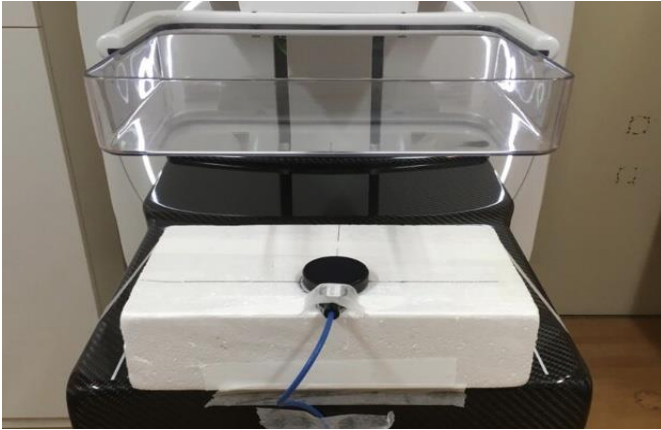


図 9 空気カーマ測定時の外観(電離箱線量計)

6.結果

6.1 一回曝射法による MGD 測定結果

方法 5.1 より、一回曝射法によって得られた Mo/Mo の 2D 及び 3D の MGD[mGy/mAs]を
表 3,4 及び図 10,11 に示す。

表 3 Mo/Mo 2D

.PMMA thickness[mm]	tube voltage[kV]		
	28	30	32
20	0.051mGy	0.067mGy	0.088mGy
30	0.041mGy	0.054mGy	0.070mGy
40	0.033mGy	0.044mGy	0.057mGy

表 4 Mo/Mo 3D

PMMA thickness[mm]	tube voltage[kV]		
	28	30	32
20	0.051mGy	0.065mGy	0.087mGy
30	0.040mGy	0.053mGy	0.069mGy
40	0.032mGy	0.042mGy	0.057mGy

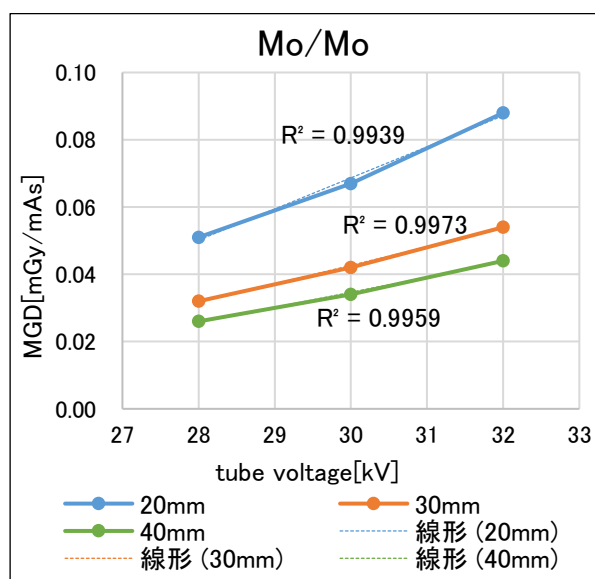


図 10 単純撮影法による MGD[mGy/mAs]

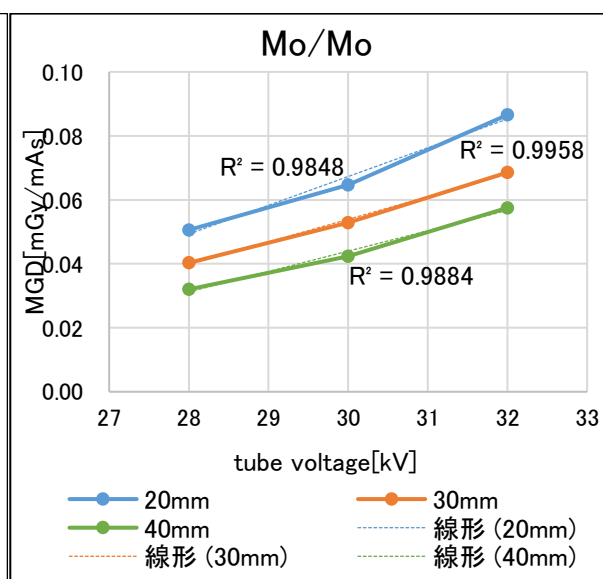


図 11 トモシンセシス法による MGD[mGy/mAs]

Rh/Ag の 2D 及び 3D の MGD[mGy/mAs]を表 5,6 及び図 12,13 に示す。

表 5 Rh/Ag 2D

PMMA thickness[mm] \ tube voltage[kV]	28	30	32
20	0.044mGy	0.059mGy	0.069mGy
30	0.032mGy	0.045mGy	0.054mGy
40	0.026mGy	0.035mGy	0.044mGy

表 6 Rh/Ag 3D

PMMA thickness[mm] \ tube voltage[kV]	28	30	32
20	0.040mGy	0.048mGy	0.069mGy
30	0.029mGy	0.041mGy	0.052mGy
40	0.026mGy	0.034mGy	0.044mGy

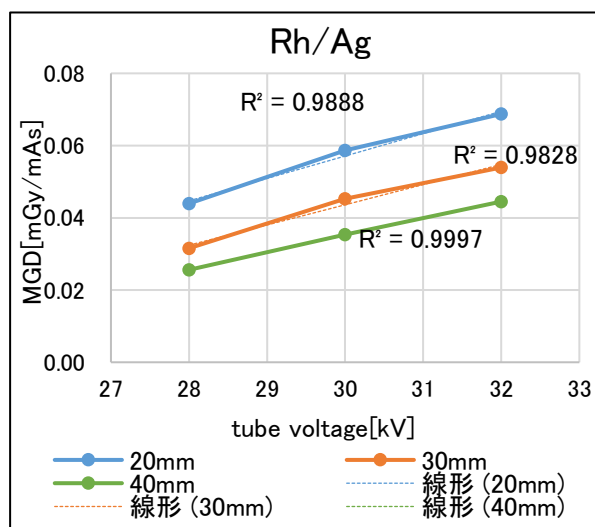


図 12 単純撮影法による MGD[mGy/mAs]

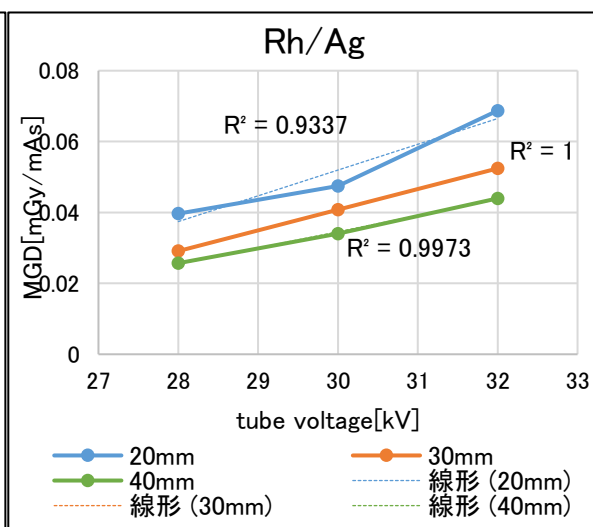


図 13 トモシンセシス法による MGD[mGy/mAs]

W/AI の 2D 及び 3D の MGD[mGy/mAs]を表 7,8 及び図 14,15 に示す。

表 7 W/AI 2D

PMMA thickness[mm] \ tube voltage[kV]	28	30	32
20	0.052mGy	0.076mGy	0.089mGy
30	0.042mGy	0.059mGy	0.076mGy
40	0.031mGy	0.044mGy	0.066mGy

表 8 W/AI 3D

PMMA thickness[mm] \ tube voltage[kV]	28	30	32
20	0.049mGy	0.064mGy	0.082mGy
30	0.040mGy	0.054mGy	0.066mGy
40	0.034mGy	0.047mGy	0.066mGy

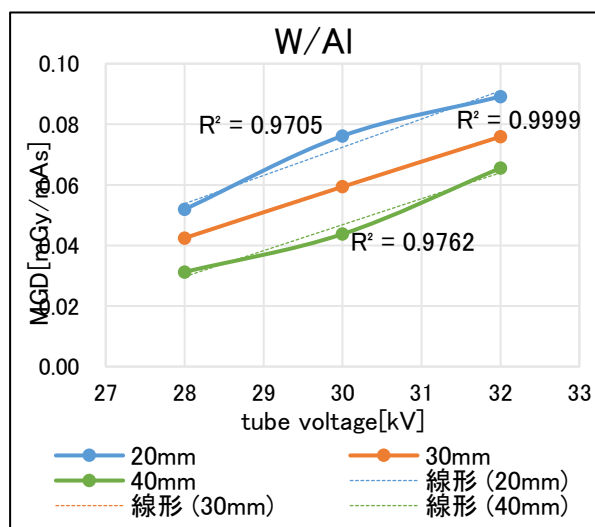


図 14 単純撮影法による MGD[mGy/mAs]

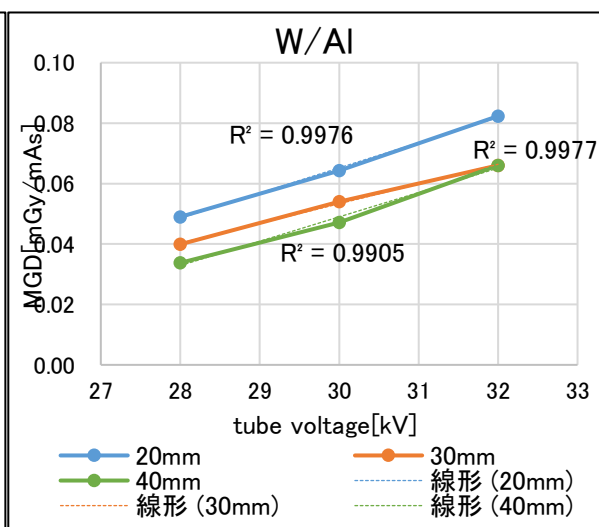


図 15 トモシンセシス法による MGD[mGy/mAs]

これより、単純撮影法とトモシンセシス法に関わらず、Mo/Mo,Rh/Ag,W/AI の全てのターゲット/フィルタの組み合わせにおいて、PMMA 厚が厚いほど、また管電圧が低いほど MGD が減少する傾向がある。但し、これらの前提は同一条件下で成り立つ。

6.2 PMMA 厚固定時の各ターゲット/フィルタにおける MGD と管電圧の関係

PMMA 厚を固定した場合の Mo/Mo,Rh/Ag,W/Al の 2D のグラフを図 16 に、3D のグラフを図 17 に示す。

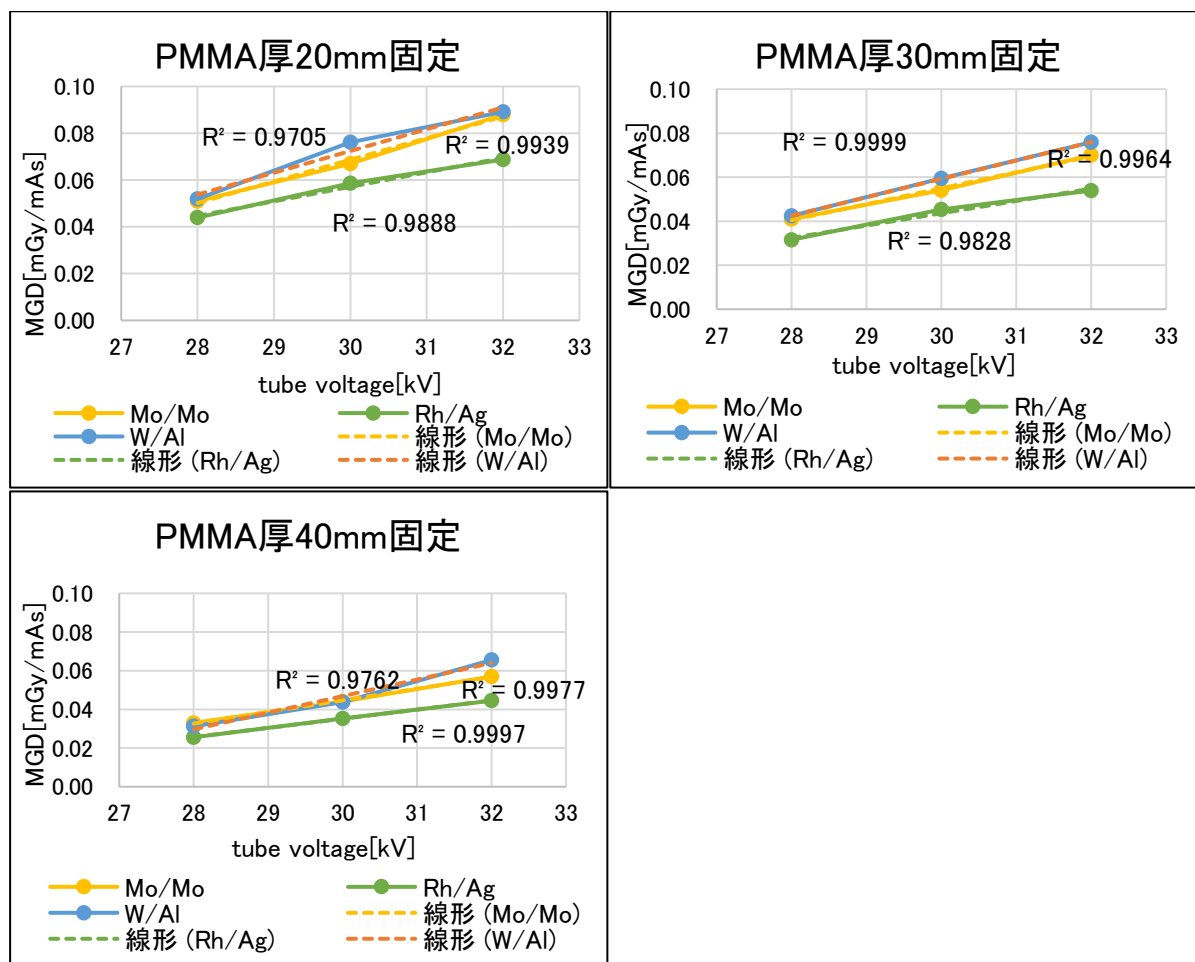
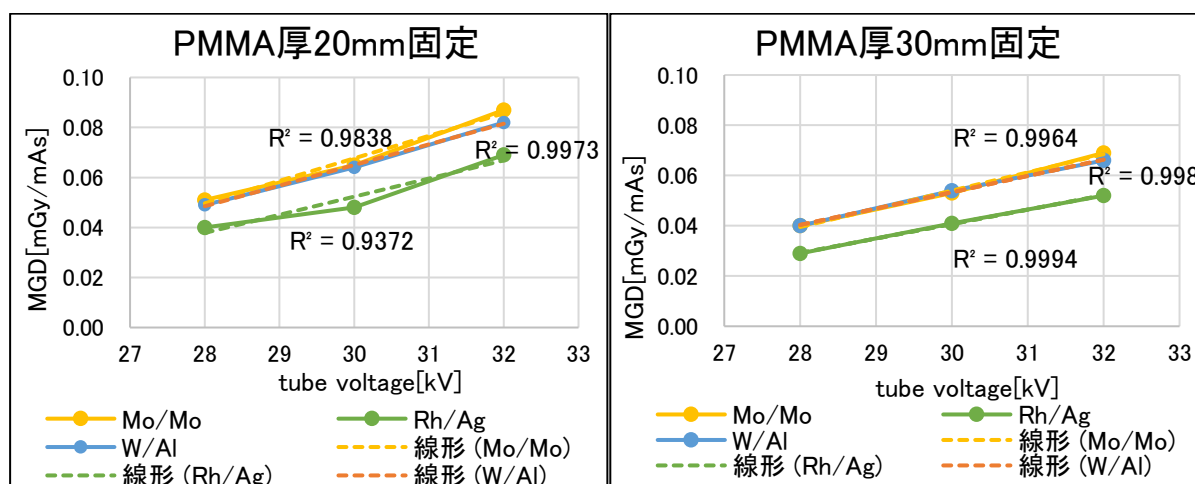


図 16 単純撮影法(2D)



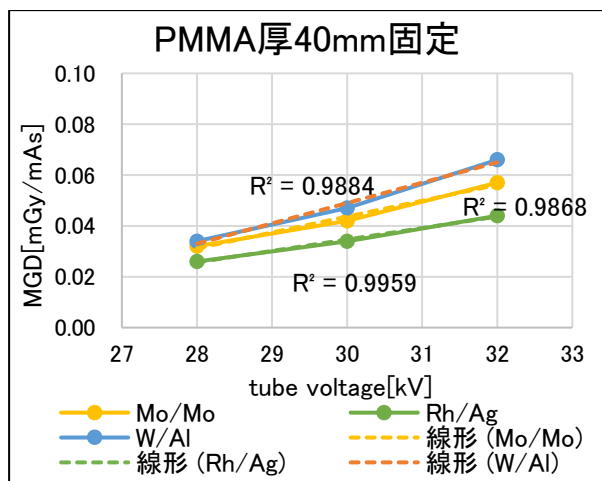
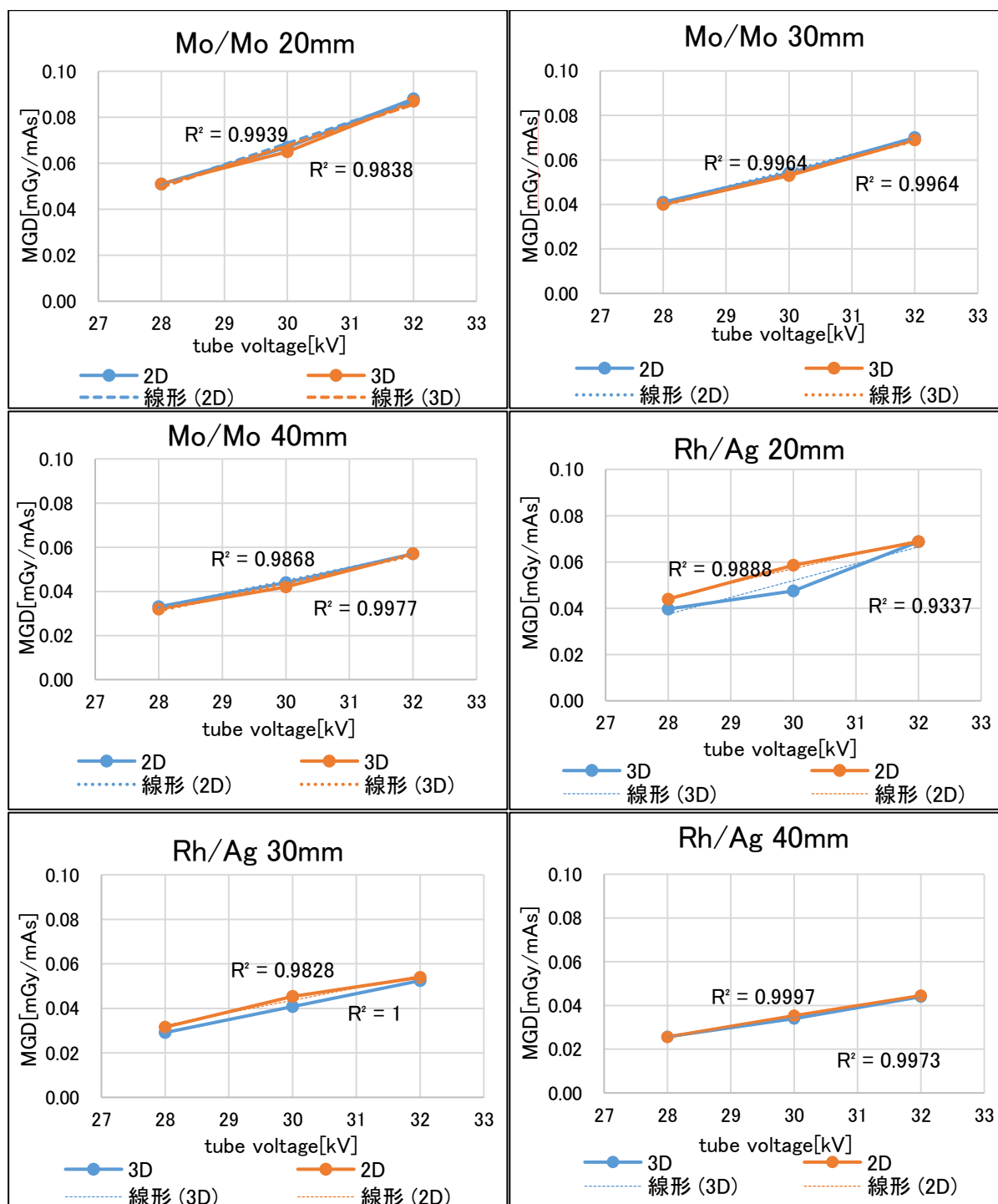


図 17 トモシンセシス法(3D)

図 16 に示す 2D、での MGD は PMMA 厚 30mm 以外では Mo/Mo と W/AI は不確かさの範囲内で一致し、Rh/Ag で低下した。一方、図 17 に示す 3D での MGD は PMMA 厚 40mm 以外では W/AI と Mo/Mo は不確かさの範囲内で一致し、Rh/Ag で低下した。

6.3 PMMA 厚固定時の 2D と 3D の MGD[mGy/mAs]比較

PMMA 厚 20mm,30mm,40mm 固定時における 2D と 3D を比較したグラフを図 18 に示す。



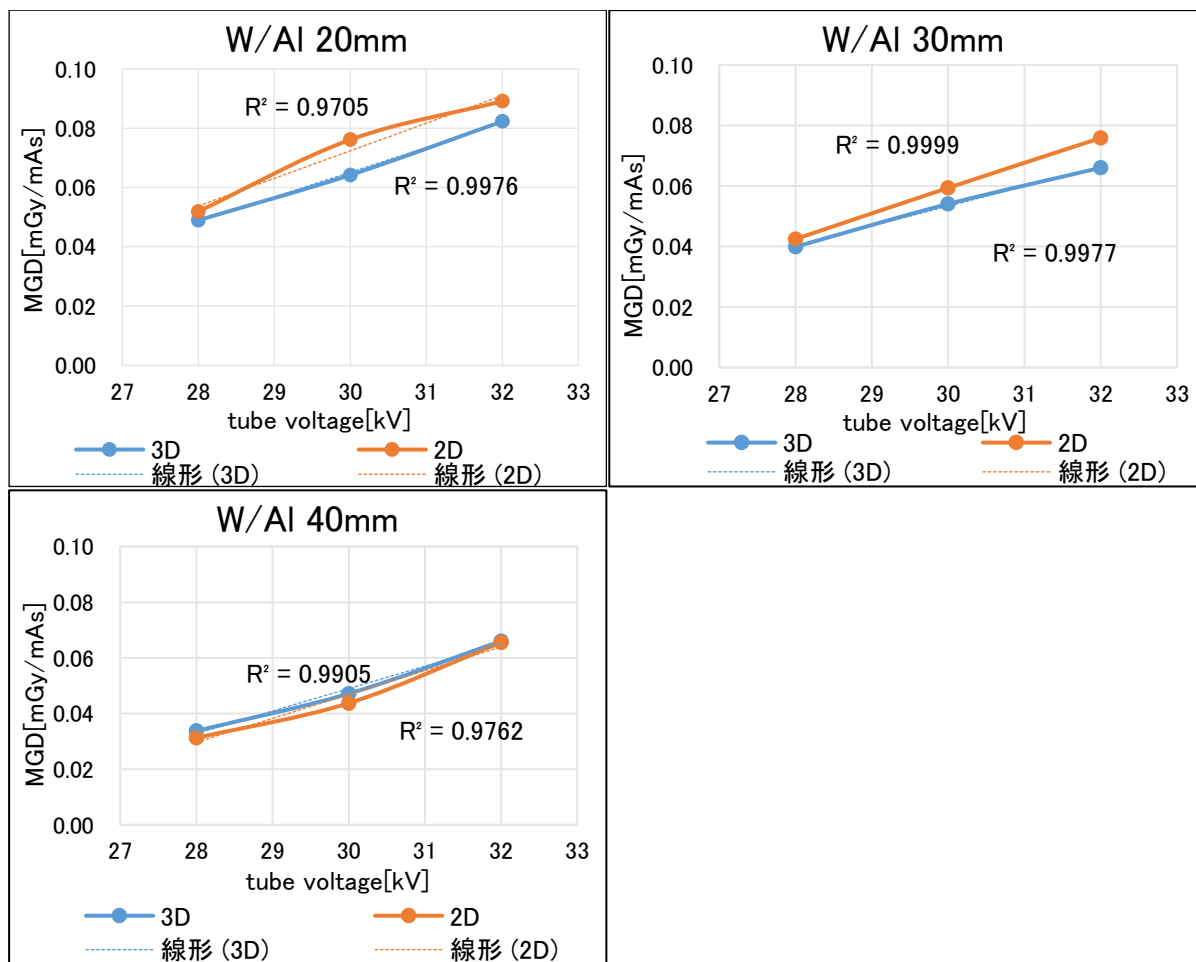


図 18 2D と 3D の MGD 比較

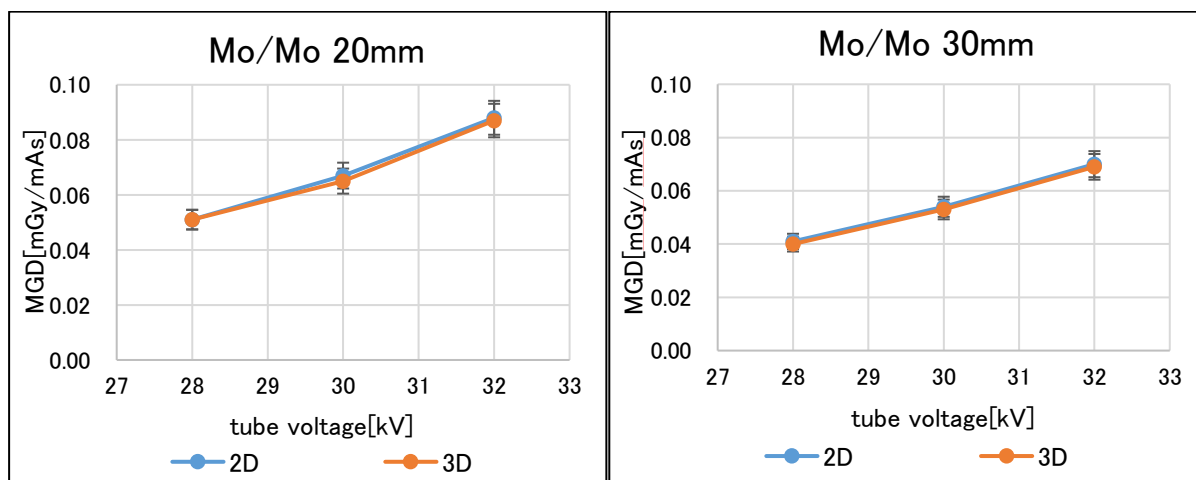
全てのターゲット/フィルタの組み合わせにおいて 2D の方が大概高くなったが、その差は僅差(平均 2%,6%,4%)であり、不確かさの範囲内であった。

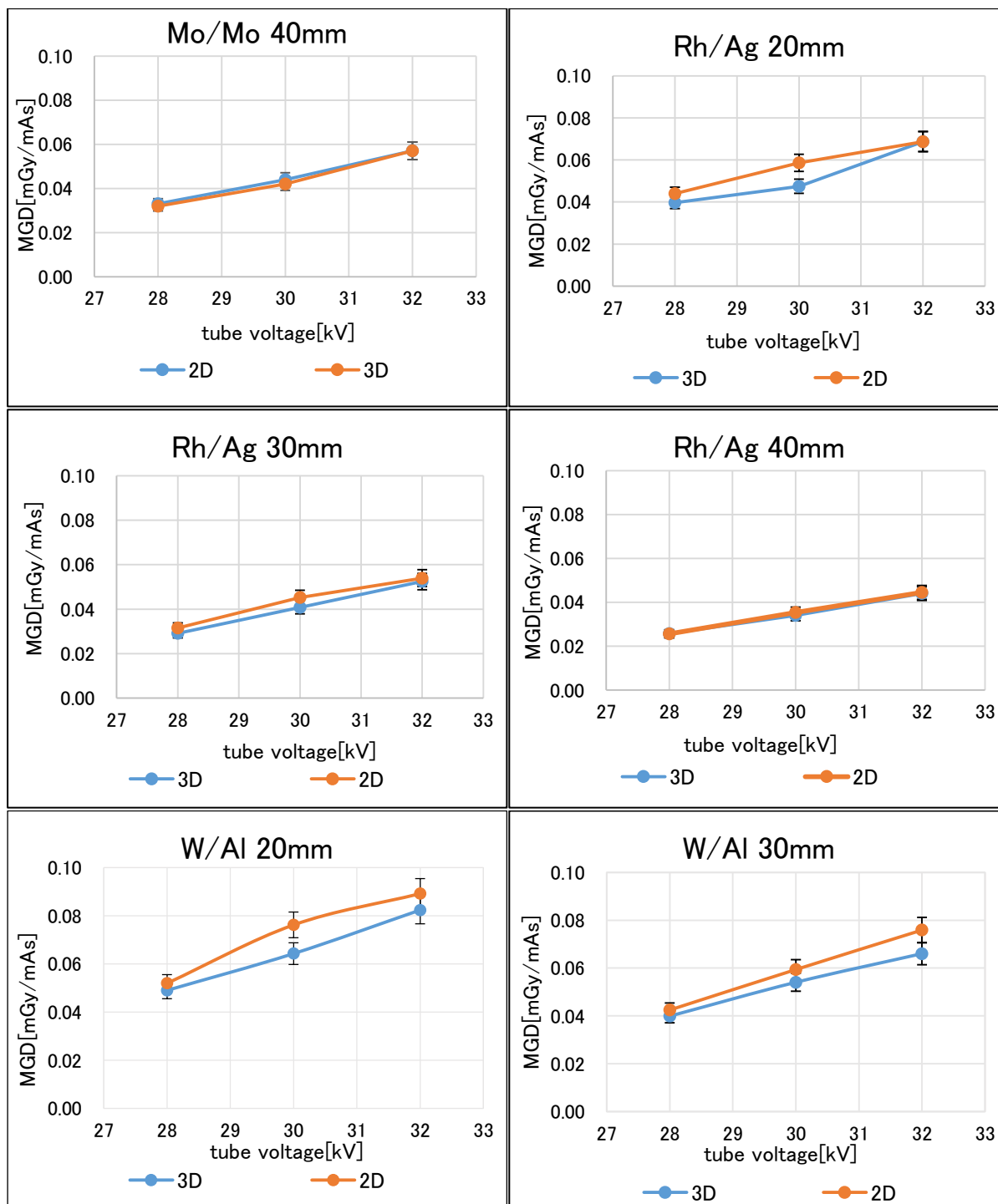
次にガラス線量計の計測不確かさを表 9 に示す。

表 9 ガラス線量計の計測不確かさ⁴⁾⁶⁾⁷⁾

項目	相対不確かさ(%)
素子間の感度ばらつき	2.0
リーダ読取値の再現性	1.0
読取ポジション間ばらつき	1.7
相対合成不確かさ	3.0
指頭形線量計の不確かさ	1.4
ガラス+線量計の相対合成不確かさ	3.3
相対拡張不確かさ	7

また、相対拡張不確かさを±7%と見積もった時のグラフを図 19 に示す。





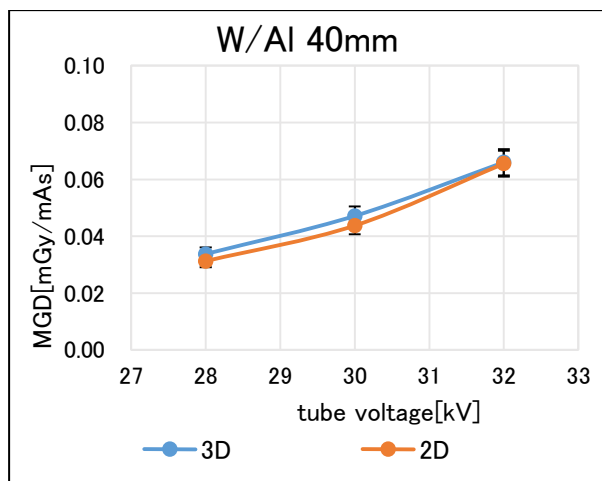


図 19 相対拡張不確かさを考慮したグラフ

図 19 より、Mo/Mo に関しては不確かさの範囲内で一致した。また Rh/Ag, W/Al とも PMMA 厚 20mm においては不確かさの範囲外であったが、30mm, 40mm 厚においては一致した。

6.4 AEC モードにおける 2D と 3D の MGD 比較

通常、臨床においては AEC モードでの撮影で行っているため、AEC モードにおける 2D と 3D の MGD 比較を行った。結果を表 10 に示す。

ただし、撮影条件は以下の通り。

	Mo/Mo		Rh/Ag		W/Al	
	2D	3D	2D	3D	2D	3D
管電圧	26kV	26kV	34kV	34kV	30kV	30kV
mAs 値	26.8mAs	25.7mAs	29.1mAs	28.9mAs	42mAs	47mAs
PMMA 厚	20mm	20mm	40mm	40mm	40mm	40mm

表 10 AEC モードにおける 2D と 3D の MGD 比較

	2D	3D	3D/2D(%)
Mo/Mo	1.035	0.986	-4.7
Rh/Ag	1.701	1.774	4.3
W/Al	2.160	2.209	2.3

Mo/Mo では 2D の方が約 4.7%高く、Rh/Ag では約 4.3%、W/Al では約 2.3%3D の方が高くな
ったが、いずれも不確かさ(±7%)の範囲内であった。

6.5 管電圧および PMMA 厚と MGD の近似関数

管電圧及び PMMA 厚の 2 変数を含めた 1mAs あたりの MGD 近似式は、回帰分析により
次式の通りとなった。

$$\text{Mo/Mo } 2\text{D: MGD} = -0.1329 + 0.0075 \times (\text{管電圧}) - 0.0012 \times (\text{PMMA 厚})$$

$$3\text{D: MGD} = -0.1339 + 0.0075 \times (\text{管電圧}) - 0.0012 \times (\text{PMMA 厚})$$

$$\text{W/Al } 2\text{D: MGD} = -0.1645 + 0.0087 \times (\text{管電圧}) - 0.0013 \times (\text{PMMA 厚})$$

$$3\text{D: MGD} = -0.1492 + 0.0076 \times (\text{管電圧}) - 0.0008 \times (\text{PMMA 厚})$$

$$\text{Rh/Ag } 2\text{D: MGD} = -0.0869 + 0.0055 \times (\text{管電圧}) - 0.0011 \times (\text{PMMA 厚})$$

$$3\text{D: MGD} = -0.1082 + 0.0059 \times (\text{管電圧}) - 0.0009 \times (\text{PMMA 厚})$$

実測値と上記の近似式から得られた計算値との誤差を表 11 に示す。

但し、実測値と計算値の単位は[mGy/mAs]

表 11 実測値と計算値の誤差

Mo/Mo 2D

平均誤差 : 0.47%±5.37%

管電圧(kV) PMMA厚(mm)	28			30			32		
	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)
20	0.051	0.053	-4.0	0.067	0.068	-1.6	0.088	0.083	5.9
30	0.041	0.041	-0.3	0.054	0.056	-3.8	0.070	0.071	-1.6
40	0.033	0.029	13.4	0.044	0.044	-0.3	0.057	0.059	-3.6

Mo/Mo 3D

平均誤差 : 0.48%±5.44%

管電圧(kV) PMMA厚(mm)	28			30			32		
	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)
20	0.051	0.052	-2.1	0.065	0.067	-3.1	0.087	0.082	6.0
30	0.040	0.040	-0.3	0.053	0.055	-3.8	0.069	0.070	-1.6
40	0.032	0.028	13.8	0.042	0.043	-2.6	0.057	0.058	-1.9

W/AI 2D

平均誤差 : 0.17%±4.11%

管電圧(kV) PMMA厚(mm)	28			30			32		
	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)
20	0.052	0.055	-5.2	0.076	0.072	5.4	0.089	0.090	-0.7
30	0.042	0.042	1.1	0.059	0.059	-0.2	0.076	0.077	-1.4
40	0.031	0.029	6.9	0.044	0.047	-6.3	0.066	0.064	2.1

W/AI 3D

平均誤差 : 0.09%±3.67%

管電圧(kV) PMMA厚(mm)	28			30			32		
	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)
20	0.049	0.049	0.7	0.064	0.064	0.5	0.082	0.079	3.9
30	0.040	0.041	-1.6	0.054	0.056	-3.2	0.066	0.071	-7.2
40	0.034	0.032	4.1	0.047	0.048	-1.2	0.066	0.063	4.8

Rh/Ag 2D

平均誤差 : 0.29%±4.95%

管電圧(kV) PMMA厚(mm)	28			30			32		
	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)
20	0.044	0.045	-2.9	0.059	0.056	4.2	0.069	0.067	2.2
30	0.032	0.034	-7.9	0.045	0.045	0.1	0.054	0.056	-4.2
40	0.026	0.023	9.9	0.035	0.034	3.0	0.044	0.045	-1.8

Rh/Ag 3D

平均誤差 : $0.58\% \pm 7.36\%$

管電圧(kV) PMMA厚(mm)	28			30			32		
	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)	実測値	計算値	誤差(%)
20	0.040	0.039	0.8	0.048	0.051	-7.1	0.069	0.063	9.3
30	0.029	0.031	-5.1	0.041	0.042	-3.8	0.052	0.054	-3.3
40	0.026	0.022	17.0	0.034	0.034	0.8	0.044	0.046	-3.4

表 11 より、実測値と近似計算値との誤差は Mo/Mo の 2D では平均 $0.47\% \pm 5.37\%$ 、3D では $0.48\% \pm 5.44\%$ 、W/AI の 2D では $0.17\% \pm 4.11\%$ 、3D では $0.09\% \pm 3.67\%$ 、Rh/Ag の 2D では $0.29\% \pm 4.95\%$ 、3D では $0.58\% \pm 7.36\%$ となり、全ての平均値 \pm SD は $0.35\% \pm 0.18\%$ となった。この MGD 近似式は臨床使用において有用な式と考えられる。この MGD 近似式を用いることにより、臨床の現場における MGD は、使用するターゲット/フィルタ、2D または 3D、管電圧及び乳房厚を代入し、mAs 値を乗じることにより容易に算出が可能となる。

6.考察

撮影条件を固定した実験系においては、2Dと3DのMGDを比較した結果、全てのターゲット/フィルタの組み合わせにおいて2Dの方が値が大きく、Mo/Moでは平均2%、Rh/Agでは平均6%、W/AIでは平均4%の差があったが、ガラス線量計の不確かさ(±7%)を考慮すると、測定誤差範囲内の変動と考えられる。

次に、AECモードで測定した結果は、3Dの方が平均0.6%の線量増加となったが、AECモードでも同様に全て不確かさ(±7%)の範囲内で一致した。

7.結論

今回は2社による比較実験であったが、撮影条件を固定した実験系、AECモードともに2D,3DのMGD差は測定における不確かさ(±7%)の範囲内の変動であり、被曝線量の差は認められなかった。

8.参考文献

- 1) Gisella Gennaro, D.Bernardi, N.Houssami : Radiation dose with DBT compared to DB per-view analysis. Eur Radiol:28:573-581, 2018
- 2) 乳癌診療ガイドライン 2 疫学・診断編,174-176
- 3)上村拓幹、乳房撮影における新しいファントムを用いた平均乳腺線量計測の有用性に関する研究 大阪大学医学部保健学科放射線技術科学専攻 平成29年度卒業研究

- 4) 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
- 5) 大森望未、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の検討 大阪
大学医学部保健学科放射線技術専攻 平成 28 年度卒業研究
- 6) 旭硝子株式会社 電子カンパニー: 蛍光ガラス線量計 基本特性資料
- 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), 45, 2018