

令和3(2021) - 4(2022) 年度援助 研究課題最終報告書

提出: 2023 年 4 月 10 日

日本医学物理学会 御中

1. 研究課題名

日本語	MRリニアックの強磁場下における水吸収線量計測法の確立
英語	Dosimetry of Absorbed Dose to Water in Strong Magnetic Field of MR-linacs

2. 研究代表者

(ふりがな)	ふじた ゆきお	JSMP 会	員番号	1496
氏 名	藤田 幸男			
所属機関	駒澤大学(および千葉大学大学院,非常勤)			
部 署	医療健康科学部			
役 職	准教授	E-mail	yfujita@koma	azawa-u.ac.jp
所在地	〒154-8525			
	東京都世田谷区駒沢 1-23-1			
電話	03-3418-9531	FAX		

3. 研究組織(研究代表者以外の参加者氏名・所属機関) 行追加可

氏名	所属機関
佐藤 優樹	東京医科歯科大学病院 放射線部
安居 虹希	がん・感染症センター 都立駒込病院 放射線物理室
恒田 雅人	千葉大学大学院医学研究院 MR 画像誘導即時適応放射線治療学寄附講座
阿部 幸太	千葉大学大学院医学研究院 MR 画像誘導即時適応放射線治療学寄附講座
河内 徹	千葉県がんセンター 放射線治療部 物理室
遠山 尚紀	東京ベイ先端医療・幕張クリニック 医療技術部医学物理室
水野 秀之	量子科学技術研究開発機構QST病院 放射線品質管理室

4. 研究目的、背景

MR リニアックシステムは治療中にリアルタイムでの標的体積とリスク臓器の動きを被ばくすることなく追跡することが可能であり、即時適応放射線治療技術など放射線治療技術のさらなる高精度化への応用が期待されている。 このような背景から世界中で MR リニアックシステムの臨床導入数が急速に増えており、本邦においても臨床導入が進んでいる。 高磁場の MR リニアックシステムでは従来の計測法をそのまま使用することができず、新たな補正係数とフォーマリズムの導入が必要である。先行研究では1から1.5 T の高磁場下での電離箱線量計を用いた計測において 最大で約 10%の応答変化を報告している [1,2]。主に電離箱応答は磁場強度、ビームエネルギー、電離箱タイ プに依存し、さらに磁場-ビーム-電離箱の互いの向きによっても変化が生じる。これに対して van Asselen らは磁 場補正係数k_Rを導入した新しいフォーマリズムを提案している [3]。

$$D_{w,Q} = M_Q N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0} k_{\vec{B}}$$
(1)

つまり、従来のフォーマリズムに対して磁場強度とビームエネルギー、電離箱タイプに依存して変化するk_Bが必要となり、k_Bを使用する際には、磁場、ビーム、電離箱の各方向を考慮する必要がある。

高磁場下での電離箱による水吸収線量計測に関する先行研究にはいくつかの問題点がある。現在、市販化されている MR リニアックシステムで高磁場を使用しているのは Elekta 社の Unity (1.5T)である。磁場補正係数を報告した先行研究は⁶⁰Co γ線や6 MV 光子線を使用した実測やモンテカルロシミュレーションを用いて算出されたものが多く、Unity の線質である 7 MV FFF を用いた検討はほとんど行われていない。また、多くの研究で用いられている磁場の条件(強度や方向)についても Unity と異なる。さらに、磁場補正係数が報告されている電離箱線量計は非常に限られており、各電離箱の磁場中における挙動が完全に明らかになっていない。したがって、磁場補正係数や磁場下における電離箱の応答変化については追加研究が必要とされている。

電離箱周囲における空気層の存在も電離箱線量計の計測結果へ与える影響が大きい。1.5 T の磁場において 電離箱周囲に0.2 mmの空気層が存在することで2.5%以上の検出器応答の変化が生じることが報告されている。 これは磁場下で防水鞘や固体ファントムを使用した計測において大きな問題となることを示唆している。検出器周 囲の空気層による検出器応答への影響についても Unity を用いて測定した報告はなく、モンテカルロシミュレー ションでの評価がほとんどである。これについても Unity を使用した実測による追加研究が必要とされている。

放射線治療施設における線量評価が正しいと保証するために第三者評価も提供される必要がある。本邦では ガラス線量計を使用した出力線量の第三者評価が確立されている。ガラス線量計は小型の固体線量計であり、 電離箱線量計と比較して検出器内での電子の挙動について磁場による影響が小さいと考えられるため、磁場下 での検出器として有用であることが示唆される。しかし、磁場下でのガラス線量計の線量計測に関する研究は少 なく、モンテカルロシミュレーションによるものだけである。これについてもその有用性を明らかにするために Unity を使用した実測による研究が必要とされている。

MRリニアックシステムにおける水吸収線量計測には解決されていない様々な問題があり、国外においても水吸 収線量計測法が確立されていない。このため MR リニアックシステムを使用する施設では、研究報告を調べ、各 施設で妥当性を判断して線量計測を行っているのが現状である。MR リニアックシステムは既存の放射線治療装 置にはない利点を持っているため注目度が高く、今後導入する施設の増加が予想される。MR リニアックシステム を用いた高精度放射線治療における安全性の担保のためにも早急な対応が必要とされている。

本研究は MR リニアックシステムの高磁場下における水吸収線量計測法を確立することを最終目的とする。また電離箱線量計による標準計測法だけでなく、小照射野や強度変調放射線治療(IMRT)などの非標準条件における線量計測法、ガラス線量計による線量計測法についても明らかにする。本研究の成果により MR リニアックシステムを用いた放射線治療における安全性の担保と投与線量の不確かさの低減が期待できる。

5. 研究成果概要

研究期間において、研究達成目標を実現するために、

1. 電離箱線量計による水吸収線量計測について、これまでに報告されている文献のデータ解析とまとめ、 得られたデータに対する実証実験を実施

- 詳細な結果は取りまとめて医学物理誌に投稿中である。

2. モンテカルロ法による高磁場下におけるガラス線量計を用いた線量計測のための補正係数の算出

- Elekta Unity だけでなく、ViewRay MRIdian のビームをモンテカルロシミュレーションで再現し、

市販化された MR-Linac 装置すべてを対象として補正係数の検討を実施した。

- 固体ファントムを使用した郵送による線量測定のために線量計周囲の空気層の影響を詳細に検討した。 を実施した。以下の項にこれらについての要点を概説する。

1. 電離箱線量計による磁場下での水吸収線量計測

1.1 磁場補正係数

これまでに様々な電離箱タイプにおいて磁場補正係数が報告されているが、その中で円筒形電離箱の PTW 30013 および IBA FC65-G における磁場補正係数が直接計測による方法とモンテカルロ法で数多く検証されて いる線量計であった。その他の磁場下での線量計測に対応した円筒形電離箱は報告が限られていた。磁場補 正係数の決定には静磁場を落とした状況での測定が必要となり、電離箱線量計ごとに測定で決定することは困 難である。したがって、報告値からまとめた結果を代表値として採用することが有力な方法である。表 1 に Elekta Unity に対する磁場補正係数の報告値のまとめを示す。磁場による電離箱線量計応答は静磁場方向と電離箱長 軸との関係により大きく変化し、垂直に設置した場合には約4%の変化を示している。一方で平行に設置した場合 には、影響が小さくなる(約1%)。IBA FC65-G に対する報告においても同様の特性を示しており、同様に複数の 文献から得られた磁場補正係数の平均は垂直のとき 0.955、平行のとき 0.997 であった。また、これら2つの電離 箱型式について同じ型式内での磁場補正係数の個体差を評価した結果では、その標準偏差は 0.2%以下であっ た。この結果は、同一型式の電離箱線量計に対して単一の磁場補正係数を適用することの可能性を示唆してい る。低磁場 (B = 0.35 T)の MRIdian においても、線量計応答の変動が報告されており、磁場補正係数の適用が 必要とされる(表 2)。しかし、MRIdian については先行研究が非常に限られており、さらなる研究が必要される。

1.2 MR リニアックにおける水吸収線量計測の基準条件

文献調査から得られた MR リニアックの特性を考慮した標準計測法の基準条件を表3に示す。まず、ファントム 材質は従来の水吸収線量の標準計測法と同様に水であるが、磁場下では電離箱周囲に空気層が存在する場合 に大きな応答変化を生じるため、防水鞘を使用しないことが推奨される。電離箱線量計は磁場補正係数の検証 が数多く実施されている円筒形電離箱の PTW 30013 および IBA FC65-Gの2つの信頼性が高い。磁場による 電離箱応答変化への補正が 1%以下と小さいため、静磁場方向に対する電離箱長軸の設置方向は平行が推奨 される。Elekta Unity の磁場下での絶対測定に関するレポートでは、ガントリー角度が0度のとき管内のヘリウム 充填レベルによって線量出力が最大0.9%影響を受けるとされていが、現在 Elekta Unity が導入されている施設 において、線量出力に影響を与えるヘリウム充填レベルに達する装置は確認されていない。そのため、線量計設 置の容易さ等を考慮してガントリー角度は0度とした。

		静磁場方向と電離箱長軸の関係			
	-	垂直		2	行
方法	文献	$k_{ec{ extbf{B}}, extbf{Q}}$	$u\left(k_{\overrightarrow{B},Q} ight)$	$k_{\overrightarrow{\mathrm{B}},\mathrm{Q}}$	$u\left(k_{\overrightarrow{\mathrm{B}},\mathrm{Q}} ight)$
カロリーメーター	de Prez(2019)	0.9630	0.34%	0.9850	0.34%
アラニン線量計	Billas(2021)	0.9626	0.31%	0.9942	0.46%
	Pojtinger (2020)			0.9901	0.73%
Monte Carlo 法	O'Brien(2016)	0.9610	0.15%	0.9940	0.15%
	Malkov(2018)			0.9881	0.10%
	Pojtinger (2018)			0.9963	0.16%
ハイブリッド法	van Asselen(2018)	0.9630	0.21%	0.9920	0.20%
相互校正	Woodings(2019)	0.9610	0.42%	0.9900	0.40%
平均(標準偏差,1SD)		0.90	62(1)	0.99	91(4)

表 1. PTW 30013 に対する磁場補正係数(Elekta Unity, B = 1.5 T)

表 2 PTW 30013 に対する磁場補正係数(ViewRay MRIdian、B=0.35 T)

		静磁場方向と電離箱長軸の関係			
		垂直		平行	
方法	文献	$k_{\overrightarrow{\mathrm{B}},\mathrm{Q}}$	$u\left(k_{\overrightarrow{B},Q}\right)$	$k_{\overrightarrow{\mathrm{B}},\mathrm{Q}}$	$u\left(k_{\overrightarrow{B},Q}\right)$
カロリーメーター	Krauss(2020)	0.9706	0.78%	0.9936	0.79%
アラニン線量計	Billas(2021)	0.9714	0.34%	0.9971	0.34%

表 3. MR リニアックに対する水吸収線量計測の基準条件

項目	基準条件
ファントム材質	水
電離箱線量計	PTW 30013 または IBA FC-65 G
静磁場方向に対する電離箱長軸の設置方向	平行
校正深 (dc)	10 g cm ⁻²
電離箱の基準点	電離空洞の幾何学中心
線源-電離箱間距離 (SCD)	90 cm (ViewRay MRidian) 143.5 cm (Elekta Unity)
校正深での照射野サイズ	$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$
ガントリー角度	0° (ViewRay MRidian) 0° (Elekta Unity)

1.3 PTW 30013 と IBA FC65-G による水吸収線量計測の比較検証

比較検証では PTW 社製 30013 と IBA 社製 FC65-G の 2 種類のファーマ形電離箱線量計を使用した。これらの電離箱線量計はどちらもリニアック標準での校正により水吸収線量校正定数が得られている。1.1 で示した磁場補正係数を用いて、1.2 の基準条件で Elekta Unity (B = 1.5 T)を用いて比較検証の測定を実施した。提案した基準条件からは外れるが、磁場補正係数の妥当性を検討するために、電離箱長軸と静磁場方向の関係が垂直の関係についても、1.1 で示した磁場補正係数を適用して水吸収線量を計測した。また、リニアック出力変動は外部モニタ線量計を使用して補正した。

計測された水吸収線量は、4 条件の計測値に対する平均から 0.1%(標準偏差: 0.03)以下で一致した。磁場補 正係数以外の影響を最小として計測した水吸収線量は異なる線量計タイプと線量計設置方向で検証した結果 (合成不確かさ: 0.5%, 注:MC 法による磁場補正係数の標準不確かさは評価が困難であるため、磁場補正係数 の不確かさを除外した評価値)、非常に良い一致を示した。これより、先行研究で報告された磁場補正係数の平 均を代表値として採用する可能性を示すことができた。今後、カロリーメータやアラニン線量計によって直接計測 された水吸収線量との比較などさらなる検証が求められる。



図1. 計測した水吸収線量の比較

エラーバーは磁場補正係数以外の合成不確かさを表示している.

2. ガラス線量計を用いた線量計測

ガラス線量計においても電離箱線量計のフォーマリズムをそのまま適用できるよう、磁場補正係数を次式のよう に定義した。

$$k_{\vec{B}}^{\text{RGD}} = \frac{D_{w,Q}^{\vec{B}}/M_{RGD,Q}^{\vec{B}}}{D_{w,Q}/M_{RGD,Q}}$$
(2)

ここで、D^B_{w,Q}は線質 Q における磁場下での水吸収線量であり、D_{w,Q}は同一線質における磁場無しの状態での水吸収線量、M^B_{RGD,Q}は同一条件において磁場下で照射されたガラス線量計の読み値、M_{RGD,Q}は同一条件において磁場無しの状態で照射されたガラス線量計の読み値である。また、ガラス線量計応答のエネルギー依存性は

線質変換係数の項で補正する。ガラス線量計の線質変換係数k_{0.0}。は、

$$k_{Q,Q_0}^{\text{RGD}} = \frac{D_{w,Q}/M_{RGD,Q}}{D_{w,Q_0}/M_{RGD,Q_0}}$$
(3)

となる。ここで、D_{w,Q}とD_{w,Qo}はそれぞれ磁場なしの状態におけるそれぞれの線質での水吸収線量であり、M_{RGD,Q}とM_{RGD,Qo}は磁場なしの状態におけるそれぞれの線質でのガラス線量計の読み値である。これらの係数より、ガラス線量計による水吸収線量は、

$$D_{w,Q} = M_{RGD,Q}^{\vec{B}} N_{D,w,Q_0}^{RGD} k_{Q,Q_0}^{RGD} k_{\vec{B}}^{RGD}$$
(4)

で決定できる。 $M_{RGD,Q}^{\vec{B}}$ は MR リニアックでのガラス線量計の読み値、 N_{D,w,Q_0}^{RGD} はガラス線量計の基準線質 Q_0 における水吸収線量校正定数である。

1.1 ガラス線量計に対する線質変換係数

MR リニアックにおける検出器応答のエネルギー依存性は、従来のリニアックのエネルギー補正係数と同様の 傾向を示した。式(3)のガラス線量計に対する線質変換係数は磁場なしの状況で計測が必要であるため、MC 法による計算値を評価した。MC 法ではそれぞれの MR リニアックの加速器ヘッドを再現し、正確な線源データを 用いて線質変換係数を算出した。図 2.に MC 法により汎用リニアックと MR リニアックに対して計算したガラス線 量計の線質変換係数と測定により評価された汎用リニアックの線質変換係数の比較を示した。線質指標 TPR20,10 に対して汎用リニアックの計算値は実験的に得られた文献値と非常に良い一致を示しており、MC 法により評価さ れた計算値の妥当性を示唆している。MR リニアックも同様の変化を示しており、従来のデータをそのまま適応で きる可能性を示した。

1.2 磁場補正係数

ガラス線量計に対する磁場補正係数は、静磁場方向に対して線量計長軸を平行とすることで影響を最小とでき る。図3はMC法でガラス線量計内の線量分布を磁場下と無しの両方の状況について計算し、式(1)で算出した 磁場補正係数である。低磁場のMRIdianでは磁場の影響は限定的であり、約±0.3%以下であった。高磁場の Unity についても、静磁場方向と線量計長軸を平行としたときには磁場の影響は小さいが、垂直となった時には 4%を超える補正が必要であることが明らかになった。これらよりガラス線量計による水吸収線量計測では、電離箱 線量計と同様に、磁場方向と線量計長軸を平行とすることが推奨される。

6





6 MV-X 線の検出器応答を基準として正規化した相対エネルギーレスポンスを示している。モンテカルロ法で算出した検出器応答の統計誤差はプロットに収まる大きさであった(<0.1%)。



図 3. ガラス線量計の磁場補正係数

1.3 空気層の影響

MC 法によりガラス線量計素子周囲の空気層が計測値に大きな変化を生させることが示された。図 4.のように ガラス線量計素子の周囲に空気層が存在したとき、均等な厚さの空気層では厚さが1mmでは、空気層が存在し ないときの応答を基準として 0.2%以内の応答変化であったが、厚さが2mmでは約2%となった(図5)。一方で、 不均等な厚さの空気層が厚い部分で1mmの時に、同様に空気層が存在しないときの応答を基準として約5% の応答変化を示した。ガラス線量計においても周囲の空気層が与える影響は無視できず、特に不均等な厚さの 空気層がガラス線量計素子周囲に存在することが大きな応答変化につながることが示された。この結果より、郵送 調査では固体ファントムを使用するために空気層による影響への対策の必要性が示唆された。



図 4. ガラス線量計周囲の空気層の計測値への影響検討のためのモンテカルロシミュレーションの幾何学的配置. ガラス線量計素子周囲の空気層が A.均等な厚さと B.不均等な厚さの2つの状況を設定した.



図 5. ガラス線量計周囲の空気層による計測値の変化率

6. 発表等(発表演題も含め詳細に記載 予定された発表も含む)

学会発表

・加藤唯斗,阿部幸太,恒田雅人,藤田幸男ら,強磁場下におけるガラス線量計を用いた水吸収線量計測のための磁場補正係数の検証,第124回日本医学物理学会学術大会,2022年9月.

・加藤唯斗,阿部幸太,恒田雅人,藤田幸男ら,強磁場下でのガラス線量計周囲の空気層が線量計応答に与える影響の検討,日本放射線腫瘍学会 第35回学術大会,2022年11月.

・藤田幸男, 佐藤優樹, 阿部幸太, 恒田雅人ら, 強磁場 MR リニアックにおける異なる電離箱線量計を用いた水 吸収線量計測の比較検証, 日本放射線腫瘍学会 第36回高精度放射線外部照射部会学術大会, 2023 年3月. ・藤田幸男, MR リニアックの磁場下における水吸収線量計測: 先行研究からの提案, 第125回日本医学物理 学会学術大会, 2023 年4月(発表予定).

•Yuito Kato, Yukio Fujita, et al. Radiation Dosimetry in Magnetic Fields with Radiophotoluminescent Glass Dosimeter: Determination of Magnetic Field Correction Factors for Different MR-Linear Accelerators, AAPM annual meeting, 2023 年 7 月(発表予定).

•Koki Yasui, Yukio Fujita, et al. Monte Carlo Calculation of the Effective Point of Measurement for a Microdiamond Detector in a Magnetic Field, AAPM annual meeting, 2023 年 7 月 (発表予定).

学術論文

・佐藤優樹,阿部幸太,恒田雅人,安居虹希,遠山尚紀,水野秀之,河内徹,藤田幸男,MR-Linacの磁場下に おける水吸収線量の標準計測:文献調査レビュー,医学物理,(投稿中).

7. 今後の課題と展開

・磁場補正係数kgの報告が限られている電離箱線量計に対する追加データ

- PTW 30013とIBA FC65-G 以外の MR 対応電離箱線量計に対する実験値の取得と計算値の検証

- ・非標準条件における線量計測法(電離箱線量計)
- 磁場による各種補正係数への影響を評価し、実際の測定における不確かさ低減に関する検討
- ・ガラス線量計による郵送線量測定に関するデータ
- 固体ファントムにおいて空気層の影響を最小とする手法の検討
- MC 法の計算値に対する実測による検証

8. 研究費の使途(内容と金額を照応するように記載 表貼付可)

別紙に記載して添付した。

9. 特記事項

特になし