ノート

論文受付
2013年7月10日

論文受理
2014年6月24日

Code No. 431

VMATにおけるダイナミックパラメータが 線量処方精度に与える影響について

松林史泰 高橋 良 伊藤 康 橋本竹雄 五月女達子 佐藤智春

がん研究会有明病院放射線治療部

緒言

近年、強度変調回転照射(volumetric modulated arc therapy: VMAT)が臨床利用され始めてきている。この照射方法は回転照射を基本として、照射中に multi-leaf collimator(MLC)の開口形状やガントリ回転速度(gantry speed: GS)、線量率(dose-rate: DR)をダイナミックに変化させる照射方法である。VMATでは、コントロールポイントごとにMLCの開口形状やGS、DRの計算が実施されて、それを基にダイナミック照射の制御を行う。従来の固定多門の強度変調放射線治療(intensity modulated radiation therapy: IMRT)と比較して照射時間の短縮化が可能になり、スループットの向上が期待できる。

Sliding window 法を用いた IMRT においては、ビー

ムが出力されている間に MLC がダイナミックに動作して照射を行う。VMAT では MLC に加えて GS や DR もダイナミックに動作するため、ダイナミックパラメータ(dynamic parameter: DP)の動作精度やそれらが線量処方に与える影響を評価する必要がある。VMAT における機器動作精度について、佐々木らはログファイルを使用して DP の動作精度を確認している¹⁾。また、Elekta 社の VMAT においては、Haga らが照射によって得られたログファイルを用いて線量再構成を行い、線量処方精度を検証した例を報告している²⁾。ほかにも VMAT における機器動作精度や線量処方精度に関する報告があるものの³⁾、DP が線量処方に与える影響について、測定を通して評価している報告は少ない。本研究の目的は、VMAT 特有の DP が線量処方精度に与える影響

Impact of Dynamic Parameters on Dose Delivery Accuracy in Volumetric Modulated Arc Therapy

Fumiyasu Matsubayashi,* Ryo Takahashi, Yasushi Ito, Takeo Hashimoto, Satoko Saotome, and Tomoharu Sato

Department of Radiation Therapy, Cancer Institute Hospital

Received July 10, 2013; Revision accepted June 24, 2014

Code No. 431

Summary

Volumetric modulated arc therapy (VMAT) is an irradiation method in which the multi-leaf collimator (MLC) shape, gantry speed and dose-rate is continuously varied. Gantry speed and dose-rate are treated as specific dynamic parameters (DPs) in VMAT, so there is a need to confirm the influence of DPs on dose distribution. The purpose of this study was to verify the impact of DPs on the accuracy of dose delivery in VMAT. We adopted an irradiation scenario in which DPs were modified from the original plan without making any changes in the dose distribution. We carried out irradiation and measured the dose distributions using a Delta4 diode array phantom, during which we acquired log files that enabled us to calculate DPs. The results showed that dose errors exceeding 1% or geometric errors greater than 1 mm were not produced by modifying the DPs. We were therefore able to verify the impact of DPs on dose delivery accuracy in VMAT.

Key words: volumetric modulated arc therapy, gantry speed, dose-rate, dynamic parameters, prescription accuracy

*Proceeding author

Table 1 Dose constraint protocol used for the treatment and summary of dose volume parameters

Structure or organ	Dose volume parameter	Limit of dose or Volume	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
PTV for prostate and seminal vesicle	D95	56.0 Gy	56.0 Gy	56.0 Gy	56.0 Gy	56.0 Gy	56.0 Gy
	D99	≥53.2 Gy	54.9 Gy	54.9 Gy	53.9 Gy	55.0 Gy	54.9 Gy
	maximum	≤64.4 Gy	61.0 Gy	60.2 Gy	63.0 Gy	59.8 Gy	59.7 Gy
	mean	≤60.5 Gy	57.8 Gy	57.4 Gy	58.7 Gy	57.5 Gy	57.2 Gy
PTV for enlarged lymph node	D99	≥53.2 Gy	51.9 Gy	55.3 Gy	57.3 Gy	56.3 Gy	55.8 Gy
	maximum	≤64.4 Gy	58.9 Gy	59.5 Gy	61.2 Gy	58.9 Gy	59.1 Gy
PTV for subclinical lymph node	D99	≥47.9 Gy	49.8 Gy	47.9 Gy	50.2 Gy	49.4 Gy	49.7 Gy
Rectum wall	V40	<60%	26.0%	26.5%	28.7%	31.3%	35.6%
	V60	<35%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	V70	<25%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	V78	<2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Small bowel	V60	<0.5 cc	0.0 cc	0.0 cc	0.0 cc	0.0 cc	0.0 cc
Bladder wall	V40	<60%	71.3%	51.2%	63.4%	46.5%	48.0%
	V70	<35%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

について、測定を基に明らかにすることである。

1. 方 法

本研究の対象は、所属リンパ節に転移を認める前立腺癌に対する骨盤照射の VMAT プラン 5 例である。なお、本研究は当施設の臨床研究倫理審査委員会の承認を受けて実施し、画像などの患者個人情報すべて匿名化して解析に用いた。

リニアックは Clinac 21EX (Varian Medical Systems 社製) を使用した。X 線のエネルギーを 10 MV とし、ガントリ回転角度は 179 度から 181 度までの 358 度として、時計回りと反時計回りの 2 アークのプランとした。線量率の上限值である設定線量率 (nominal dose rate: NDR) は 600 モニタユニット (monitor unit: MU)/min に設定し、コリメータは 20 度回転させた。

治療計画は Eclipse version 10 (Varian Medical Systems 社製) を用いて行った。Simultaneous integrated boost (SIB) 法を使用し、28 回の照射において前立腺と精嚢、ならびに転移リンパ節に対する planning target volume (PTV) の 95% 容積をカバーする線量 (D95) を 56 Gy、領域リンパ節に対する PTV の D95 を 50.4 Gy になるように計画を立案した。リスク臓器には直腸、小腸、膀胱を設定した。最適化計算においては、コントロールポイントをそれぞれのアークで 177 個に設定し、MLC の最大速度は 2.5 cm/s に設定した。線量計算は anisotropic analytical algorithm (AAA) 法で実施した。当院における PTV やリスク臓器の線量制約値と、作成したプランの結果を Table 1 に示す。なお、当施設では対

象症例に対して骨盤照射を実施したのち、PTV を前立腺と精嚢に局限して 22 Gy、11 回分割のブースト照射を実施している。したがって、最終的な線量制約値はブースト照射を考慮して評価している。

次いで、オリジナルのプランを基とした GS や DR の変更プラン (P_{modi}) を作成した。Eclipse version 10 では GS や DR を任意の値に設定することは不可能である。一方で、NDR を変化させることは可能であり、それを変化させると線量分布や単位角度ごとの MU 値を保持したままで、GS や DR が変化するプランを作成可能である。本研究では、オリジナルのプランの NDR を 100 MU/min ごとに 100 MU/min まで変化させることによって GS や DR を変化させて、DP の変化を作り出した。NDR を変化させたときの GS や DR の変化を Fig. 1 に示す。 P_{modi} はガントリ回転角度が 358 度であるため、治療寝台に X 線が当たることを避けるのは不可能である。したがって、治療計画において仮想寝台を用いることで寝台による X 線の減弱を考慮した。

測定は Delta4 (Scandidos 社製) を用いて実施した。Delta4 の表面に印字されているマークを利用して検出器をアイソセンタに設置し、位置を固定してすべての測定を行った。 P_{modi} の測定に先立って、Delta4 の線量率依存性を確認した。ガントリ角度を 0 度に設定して 10 cm×10 cm の正方形照射野を作成し、10 MV の X 線を 200 MU 照射した。線量率を 600 MU/min から 100 MU/min ごとに変化させたときの、検出器中心位置での指示値の変化を調べた。なお、Delta4 には方向依存性があり、ガントリ角度によって指示値が変化することが考え

Fig. 1 Variation in dose-rate and gantry speed caused by changing nominal dose-rate.

(a) Mean dose-rate, (b) Minimum dose-rate, (c) Maximum dose-rate,

(d) Mean gantry speed, (e) Minimum gantry speed, (f) Maximum gantry speed

a	b	c
d	e	f

られるが、今回の評価はガントリ角度ごとの MU が変わらないプランの実測値同士の比較であるため、本測定のための方向依存性の評価は行わなかった。

Delta4 の基礎特性を評価したのち、 P_{modi} の測定を実施して線量分布の取得を行った。得られた結果は Delta4 付属のソフトウェア (version : 2011 April) で解析し、100 MU/min を基準として NDR を変化したときの線量分布の違いを評価した。評価は線量差 (dose difference: DD) の許容値を 1%, 位置誤差 (distance to agreement: DTA) の許容値を 1 mm, threshold を 0% としたときの DD と DTA のパス率を指標とした。 P_{modi} を照射する際には、MLC などの経時的な位置情報が記録される dynalog ファイルと、MU やガントリ角度情報が記録される dynamic treatment log ファイルを取得した。取得した 2 種類のログファイルを用いて、NDR が 100 MU/min のときを基準として、それぞれのコントロールポイントにおける、動作するすべての MLC 位置や経過 MU、ガントリ角度の系統誤差 (systematic error: SE) と偶発誤差 (random error: RE) を算出した。SE は以下の式を用いて算出した。

$$SE_{\text{ndr}} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{i,\text{ndr}} - P_{i,100})}{n} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $P_{i,\text{ndr}}$ は任意の NDR のときのコントロールポイント i におけるパラメータであり、 $P_{i,100}$ は NDR が

Fig. 2 Dose-rate dependency of Delta4.

The vertical axis shows relative variation of measured dose normalized by the dose when the nominal dose-rate was set at 600 MU/min.

100 MU/min のときのコントロールポイント i におけるパラメータである。 n はコントロールポイントを示す。RE は以下の式を用いて算出した。

$$RE_{\text{ndr}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(P_{i,\text{ndr}} - P_{i,100}) - SE_{\text{ndr}}]^2}{n}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

2. 結果

Delta4 の線量率依存性の測定結果を Fig. 2 に示す。線量率 600 MU/min での測定線量を基準としたとき、

Table 2 Pass rate of DD and DTA under the criteria of 1% and 1 mm

Case		Nominal dose rate (MU/min)					
		600	500	400	300	200	100
1	Pass rate (DD/DTA) (%)	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
2	Pass rate (DD/DTA) (%)	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
3	Pass rate (DD/DTA) (%)	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
4	Pass rate (DD/DTA) (%)	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
5	Pass rate (DD/DTA) (%)	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100

Fig. 3 Systematic error (a) and random error (b) of MLC positions.

Fig. 4 Systematic error (a) and random error (b) of accumulated MU.

指示値の変化は0.2%以下であった。

P_{modi} の測定における DD と DTA のパス率の変化を Table 2 に示す。パス率はすべて 100% となった。Fig. 3 には、NDR を変化させたときの MLC 位置の SE と RE を示す。SE に大きな変化はなかったが、NDR の変化が大きくなると RE に変化が生じ、NDR が 600 MU/min 時の RE は平均で 0.197 mm であった。Fig. 4 には NDR を変化させたときの経過 MU の SE と RE を示す。NDR が変化しても経過 MU には大きな変化はなかった。Fig. 5 には NDR を変化させたときのガントリ角度の SE と RE を示す。RE は 0.1 度を超えることはなかった。SE はマイナスの値となり、NDR が 600 MU/min 時は平均で 0.1 度の遅れが生じる結果となった。

3. 考 察

本検証では VMAT 特有の DP を変化させて線量分布の測定を行った。DD や DTA の測定結果から、1% を超える線量差が発生することはない、また、1 mm を超える位置誤差は発生しないことがわかった。つまり、DP に変化が生じたとしても、角度ごとの MU 値が保たれていれば、線量的には 1%、幾何学的には 1 mm を超える誤差を発生しないことが明らかとなった。Ling らは VMAT のコミショニング手法を報告していて、その中には精度試験用の照射プランを使用した DP 変化時の線量処方精度の評価項目がある⁴⁾。メーカーが推奨する許容値は線量差が 2% 以内となっており⁵⁾、実際の VMAT プランを用いた本評価においても、その許容値

Fig. 5 Systematic error (a) and random error (b) of gantry angle.

を満たすことを確認できた。

MLCの動作精度と線量処方精度の関係性について、Oliverらは頭頸部に対するVMATにおいてMLC位置の系統誤差が0.6 mm変化した場合、PTVの線量指標に2%の変化が生じ、5 mmの偶発誤差が生じても線量指標の変化は小さいことを報告している⁶⁾。また、Baiらは固定多門のIMRTにおいて、0.5度のガントリ角度誤差は大きな影響を及ぼさないと報告している⁷⁾。今回の測定におけるDPの変化は報告されている誤差量より小さいため、1%の線量差や1 mmの位置誤差が発生しなかったと考える。上記の報告では線量再構成の手法を用いた評価や、固定多門のIMRTによる報告であるが、本評価によって、パス率を指標とした実測を基にしたVMATのDPが及ぼす影響を明らかにできたと考える。

今回の評価では、対象症例を骨盤部のVMATとしたが、他部位へのVMAT照射や処方線量が異なる場合は、DPの変化が本対象と異なることが考えられる。DPはログファイルなどで比較的容易に確認することが可能であり、DPの変化量が本評価と大きく変わらなければ、他部位への照射においてもDPと線量処方精度の

関係性を推定できると考える。

治療計画を行う際には、照射精度を念頭に置いてプランを立案する必要がある。照射精度が正しく評価されなければ、不必要なマージンの拡大や線量制約の変更を招き、VMATなどの高精度放射線治療の利点を最大限活用できないと考える。本研究はVMAT特有のDPが線量処方精度に与える影響を実測によって明らかにしたものであり、治療計画へフィードバックするための有用な知見を得ることができたと考える。

4. 結 語

VMAT特有のDPが線量処方精度に与える影響を調査した。本調査で使用したVMATプランにおいては、DPが変化しても1%を超える線量差や1 mmを超える幾何学的誤差は発生しないことがわかった。VMATの線量処方精度に与える影響を実測によって明らかにすることができた。

本研究の要旨は、第41回日本放射線技術学会秋季学術大会(福岡)にて発表した。

参考文献

- 1) 佐々木恒平, 宮城結城, 高倉 亨, 他. Log Fileを用いたRapidArc照射の精度検証. 医物理 2010; 30(2): 267-268.
- 2) Haga A, Nakagawa K, Shiraishi K, et al. Quality assurance of volumetric modulated arc therapy using Elekta Synergy. Acta Oncol 2009; 48(8): 1193-1197.
- 3) Nicolini G, Clivio A, Cozzi L, et al. On the impact of dose rate variation upon RapidArc implementation of volumetric modulated arc therapy. Med Phys 2011; 38(1): 264-271.
- 4) Ling CC, Zhang P, Archambault Y, et al. Commissioning and quality assurance of RapidArc radiotherapy delivery system. Int J Radiat Oncol Biol Phys 2008; 72(2): 575-581.
- 5) 岡本裕之. VMATの精度管理項目. 詳説 放射線治療の精度管理と測定技術. 中外医学社, 東京, 2012: 162-170.
- 6) Oliver M, Gagne I, Bush K, et al. Clinical significance of multi-leaf collimator positional errors for volumetric modulated arc therapy. Radiother Oncol 2010; 97(3): 554-560.
- 7) Bai S, Li G, Wang M, et al. Effect of MLC leaf position, collimator rotation angle, and gantry rotation angle errors on intensity-modulated radiotherapy plans for nasopharyngeal carcinoma. Med Dosim 2013; 38(2): 143-147.

問合せ先

〒135-8550 江東区有明 3-8-31

がん研究会有明病院放射線治療部 松林史泰