

回転型強度変調放射線治療を用いた肺定位放射線治療におけるマルチリーフコリメータのパラメータの最適化

東京大学医学部附属病院 放射線部・科 竹中 重治／今江 禄一／芳賀 昭弘／岡野由香里
根津 誠／三枝 茂輝／矢野 敬一／中川 恵一

【背景】

近年、体幹部定位放射線治療 (stereotactic body radiotherapy: SBRT) が広く臨床応用されている。SBRT は狭い領域に対して、高線量の放射線を集中投与する手法であるが、呼吸や蠕動といった生理的な運動による標的の移動が治療時の照射精度の低下につながる。また、強度変調放射線治療 (intensity modulated radiotherapy: IMRT) では、従来の照射法と比較して自由度の高い線量分布を作成可能である一方、標的が動く場合、標的の動きがマルチリーフコリメータ (multi leaf collimator: MLC) と干渉する恐れがあり、過大もしくは過小線量を生じること (interplay effect) が指摘されている。¹⁾

当院では、肺の SBRT に対して回転型の IMRT である VMAT (volumetric modulated arc therapy) を使用している。その際、interplay effect を抑えるために、治療計画装置のパラメータの 1 つである MLC 速度制約を 1.0mm/degree に制限しているが、その治療計画、照射精度への影響について検討した研究は少ない。そこで、本研究では VMAT-SBRT において、MLC 速度制約が interplay effect に与える影響を FF (filter flattened) と FFF (flattening filter free) の 2 つの照射モードにおいて明らかにすることを目的とした。

【使用機器】

直線加速器 エレクタ社製研究用リニアック
治療計画装置 Pinnacle³ (Ver. 9. 8、Philips 社)
動体ファントム QUASAR (Modus Medical Devices 社)
線量計 Pinpoint 線量計 (0. 015cc、PTW 社)

【方法】

症例

当院にて施行した肺癌に対する VMAT-SBRT のうち、FF と FFF の症例を 3 例ずつ計 6 例とした。臨床例を Table 1 に示す。計画標的体積 (planning target volume: PTV) は 11. 0–35. 8cm³、平均値は 24. 5cm³であった。

Table 1 症例

Patient	Age (y)	sex	TNM	Tumor location	PTV size(cm ³)	Tumor moving distance (mm)			
						L-R	A-P	S-I	
FF	1	84	M	pT2aN0M0	Rt middle lobe	13.1	0.3	1.3	3
	2	83	M	cT1bN0M0	Rt middle lobe	23.0	0.1	1	0.7
	3	89	M	T1N0M0	Rt upper lobe	32.1	1.2	1.7	1.9
FFF	4	46	F	cT1aN0M0	Rt lower lobe	35.8	0.2	1	3
	5	66	M	cT1aN0M0	Rt upper lobe	11.0	1	0.1	0.5
	6	78	M	T1N0M0	Rt upper lobe	32.1	2.4	-0.5	1.9

検討項目

1 治療計画の評価

MLC 速度制約を変更した際の治療計画の評価を行った。臨床で用いた MLC 速度制約 1. 0mm/degree の治療計画に対して MLC 速度制約を 2. 3、4. 6mm/degree に再設定し、最適化の条件を変更せずに最適化を実行した。作成した治療計画について DVH (dose volume histogram) による評価を行った。

2 interplay effect の再現性の評価

臨床例 6 例の中から 1 症例を選び、interplay effect の再現性の評価を行った。症例は interplay effect が起こりやすいと考えられる FFF から 1 例を選び、MLC 速度制約は 4.6mm/degree とした。動体ファントムの動作条件は頭尾方向に振幅 0、5、10mm とし、1 分あたりの呼吸数を 0、10、20bpm (breath per minute) に設定した。評価項目は吸収線量の平均値 (cGy) と標準偏差、変動係数とした。

3 interplay effect における動きの違いに対する評価

interplay effect の動きの違いに対する評価を行った。臨床例 6 例において、MLC 速度制約を 1.0、2.3、4.6mm/degree に設定し、動体ファントムを方法 2 と同条件で動作させ、評価を行った。評価項目は動体ファントムを動かさない条件である振幅 0 mm、0 bpm を基準とした際の吸収線量の差とした。

【結果】

治療計画の評価

MLC 速度制約を臨床で用いている 1.0mm/degree から 2.3、4.6mm/degree に変更し、最適化を行った際の治療計画の評価を行った。Fig. 1 に FF および FFF の DVH をそれぞれ 1 例ずつ示す。FF、FFF ともに ITV、PTV についてはほぼ一致していた。リスク臓器については若干の差異は見られたものの、概ね一致していた。

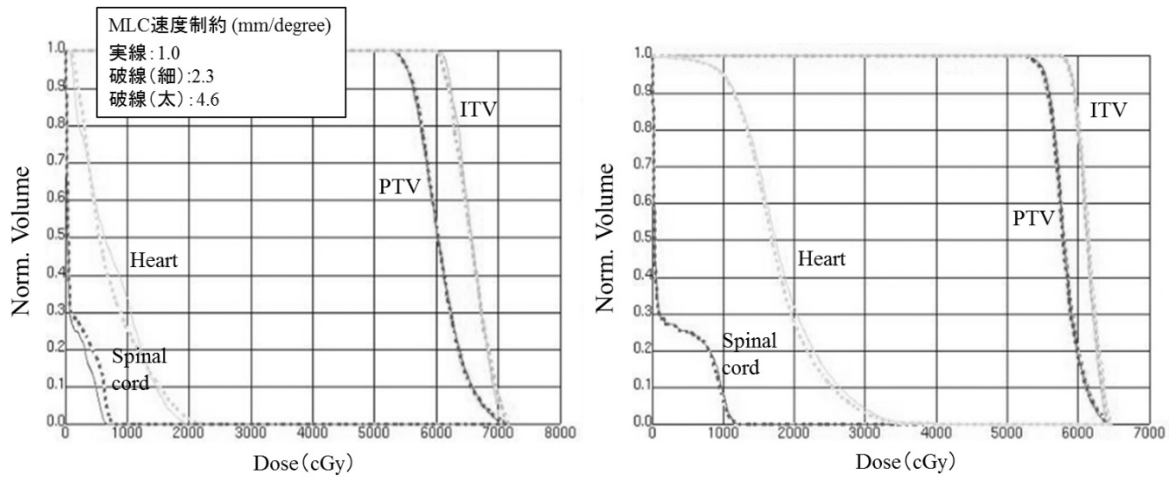


Fig. 1 FF および FFF の DVH

再現性の評価

Table 2 に各条件における平均値 (cGy) と標準偏差を、Table 3 に動体ファントムの振幅 0 mm、0 bpm を基準として求めた変動係数を示す。振幅 0 mm、0 bpm の条件で最も再現性が高く、他の条件についても変動係数は 0.2 以下であり、interplay effect はほとんど観察されなかった。

Table 2 吸収線量 (cGy) と標準偏差

	振幅 (mm)		
	0	10	20
	BPM 0	1646.9±0.6	-
BPM 10	-	1642.6±2.0	1640.2±1.1
BPM 20	-	1638.1±1.3	1632.2±2.6

Table 3 変動係数

	振幅 (mm)		
	0	10	20
	BPM 0	0.0	-
BPM 10	-	0.1	0.1
BPM 20	-	0.1	0.2

動きの違いに対する評価

動体ファントムを動かさない条件を基準とした際の吸収線量の差を相対的に比較した。Table 4 に FF における結果を、Table 5 に FFF における結果を示す。FF について、症例 2 および 3 ではすべての条件で 2.0% 以下の線量差であった。症例 1 に関しては振幅 10mm の条件で 4% 以上の線量差が観察された。また、FFF については症例 4 および 5 ではすべての条件で 2.2% 以下の線量差であったが、症例 6 では振幅 10mm の条件で 3% 以上の線量差が観察された。

Table 4 FFにおける吸収線量の差 (%)

MLC速度制約 (mm/degree)	BPM	症例1		症例2		症例3	
		振幅(mm)		振幅(mm)		振幅(mm)	
		5	10	5	10	5	10
1.0	10	1.1	4.2	-0.5	-0.7	0.3	1.1
	20	1.0	4.5	-0.7	-1.3	0.3	2.0
2.3	10	2.0	4.6	-1.7	0.7	0.0	0.2
	20	2.1	4.7	-1.9	0.9	0.0	0.0
4.6	10	2.0	4.5	-0.7	-1.1	-0.1	0.2
	20	2.0	4.6	-0.6	-1.0	0.0	0.0

Table 5 FFFにおける吸収線量の差 (%)

MLC速度制約 (mm/degree)	BPM	症例5		症例6		症例7	
		振幅(mm)		振幅(mm)		振幅(mm)	
		5	10	5	10	5	10
1.0	10	-0.2	-1.0	-0.1	-0.7	1.6	3.6
	20	0.1	-0.2	-0.1	-0.8	1.1	3.7
2.3	10	-0.8	-1.5	0.0	-0.8	0.0	-1.1
	20	-0.4	-0.9	-0.2	-0.8	-0.3	-1.2
4.6	10	-1.1	-0.8	-0.2	-0.8	-0.6	-1.9
	20	-0.7	-2.2	-0.3	-0.8	-0.5	-1.3

【考察】

MLC速度制約を変更した際の治療計画の評価では、FF、FFF共に治療計画の質に差がなかった。このことから、最も厳しいMLC速度制約の条件である1.0mm/degreeでも十分な線量分布が得られていると考えられる。

interplay effectの動きに対する評価については、ほとんどの条件で線量差は2%以内であったが、FFにおいては症例1の振幅10mmの条件で4%以上の線量差が確認された。この原因として、症例1の照射野を観察すると、他の症例と比較して照射野の中央数cmの領域に、MLCが長く留まっている傾向にあった。今回の結果は動体ファントムをアイソセンタから動かさない線量を基準として線量差を算出したため、動体ファントムが動く条件では線量が高くなったと考えられる。一部、線量差が大きくなった条件はあったものの、各MLC速度制約間で比較すると、線量差はほぼ同程度であり、MLC速度制約を変更した際の治療計画に対して、模擬腫瘍の動きに対する線量差は観察されなかった。特に、FFFはFFよりも照射時間が短いため（FFで4分30秒程度、FFFで1分30秒程度）MLC速度制約を小さくすることにより、MLC速度が速くなり、interplay effectも大きくなると想定していたが、今回の結果からはMLC速度制約を大きくしても、interplay effectが深刻になるほどの影響は与えなかった。この原因としては、本研究におけるVMATの治療計画は原体性が高く、MLCが複雑に動かなかったことがあげられる。

【結語】

FFおよびFFFのVMAT-SBRTにおいて、最適化におけるMLC速度制約の変化が標的の投与線量に与える影響について評価した。今回の結果から、FF、FFFともにMLC速度制約を変更しても治療計画の質に差はなかった。また、MLC速度制約を小さくしてもinterplay effectを無視できるような計画が作成できていた。これは、VMATの治療計画の原体性が高かったことが原因であると考えられる。

【参考文献】

- 1) Bortfeld T, Jokivarsi K, Goitein M, et al. Effects of intra-fraction motion on IMRT dose delivery: statistical analysis and simulation. Phys Med Biol. 2002; 47(13): 2203-2220.