

VMAT治療計画におけるAperture Shape Controllerを組み合わせたConvergence Modeによる放射線治療計画線量指標の改善

Improvement of radiation therapy plan dose index by Convergence Mode with Aperture Shape Controller in VMAT treatment planning

中村 浩幸¹⁾, 玉本 哲郎²⁾, 飯田 凌³⁾, 山本 将吾³⁾, 若井 展英⁴⁾, 廣橋 里奈⁵⁾, 長谷川 正俊⁶⁾

1) 奈良県立医科大学 放射線腫瘍医学講座/済生会吹田病院 中央放射線科
2) (医師) 博士 (医学) 奈良県立医科大学附属病院 医療情報部/奈良県立医科大学 放射線腫瘍医学講座
3) 済生会吹田病院 中央放射線科
4) (医学物理士) 博士 (医学) 奈良県立医科大学 放射線腫瘍医学講座
5) (医師) 済生会吹田病院 放射線科
6) (医師) 博士 (医学) 奈良県立医科大学 放射線腫瘍医学講座

Key words: Convergence Mode, Aperture Shape Controller, volumetric modulated arc therapy

【Abstract】

Purpose: Convergence Mode is a new tool that can set the criteria of convergence in three stages in the calculation of inverse planning optimization. This study aimed to show that the Convergence Mode can improve dose index when optimizing the volumetric modulated arc therapy (VMAT) treatment plan.

Methods: At the time of planning, two-step dose constraints and Aperture Shaped Controller settings were combined using three types of phantom images and clinical images. Three levels of Convergence Mode were set for each, and the dose indexes were compared and evaluated.

Results: In the phantom image, the Homogeneity Index did not deteriorate in phantom and clinical images. On setting the Convergence Mode to on, 22 and 13 out of 27 items were improved compared to off in phantom and clinical images, respectively. On setting the Convergence Mode to extended, 25 and 17 out of 27 items were improved compared to off in phantom and clinical images, respectively.

Conclusion: The change in the Convergence Mode setting in the VMAT treatment plan improved the dose index of the contour with the dose constraint under multiple conditions.

【要旨】

目的：VMAT治療計画最適化時に、Convergence Modeを使用することにより線量指標が改善することを示す。

方法：3種類ずつのファントム画像と臨床画像を用い、計画時に2段階の線量制約とAperture Shaped Controllerの設定を組み合わせ、それぞれに3段階のConvergence Modeの設定を行い、線量指標を比較し評価した。

結果：ファントム画像と臨床画像においてHIに関しては悪化することなく、Convergence Modeの設定をOnにすることで、Off時より27項目中22項目と13項目が改善し、Extendedでは25項目と17項目が改善した。

結論：VMAT治療計画において、Convergence Modeの設定を変化させた際に複数の条件下で、線量制約を設定した輪郭の線量指標が改善した。

NAKAMURA Hiroyuki¹⁾,
TAMAMOTO Tetsuro, M.D., Ph.D.²⁾, IIDA Ryo³⁾,
YAMAMOTO Shogo³⁾, WAKAI Nobuhide, Ph.D.⁴⁾,
HIROHASHI Rina, M.D.⁵⁾,
HASEGAWA Masatoshi, M.D., Ph.D.⁶⁾

- 1) Department of Radiation Oncology, Nara Medical University / Department of Radiology, Saiseikai Suita Hospital
- 2) Department of Medical Informatics, Nara Medical University Hospital / Department of Radiation Oncology, Nara Medical University
- 3) Department of Radiology, Saiseikai Suita Hospital
- 4) Department of Radiation Oncology, Nara Medical University
- 5) Radiology, Saiseikai Suita Hospital
- 6) Department of Radiation Oncology, Nara Medical University

Received August 25, 2021; accepted June 17, 2022

1. 緒 言

Volumetric modulated arc therapy (VMAT) は、ガントリーを回転させながら強度変調を行い、リスク臓器 (organ at risk : OAR) を避けながら計画標的体積 (planning target volume : PTV) に線量を集中させる技術であり、多くの施設で用いられている¹⁾。

Convergence Modeは、inverse planning最適化の計算において収束の基準を従来通りのOff、およびOn、Extendedの3段階に設定することができる新しいツールであり、Varian社製の放射線治療計画装置 (radiation treatment planning system : RTPS) であるEclipse™ (Varian Medical Systems) のVer. 15.5より実装された。設定強度は、弱い方からOff、On、Extendedである。Convergence Modeを使用

したVMATの治療計画最適化における計算の過程は、1つのMulti resolution (MR) レベルから次のMRレベルへの転換や、MRレベル内のステップの変換を制御している。Convergence Modeは、治療計画における線量制約に対する線量指標の収束結果を改良するために用いられる。しかし、Onに設定すると最適化の時間は1.2~3倍長くなることが予想され、Extendedに設定すると数時間最適化にかかることになると記載されている²⁾。なお、計算(iteration)回数の最大数はOn/Extendedにおいて、それぞれOffと比較するとMR level 1が2.5/11.2倍、MR level 2が2.0/17.8倍、MR level 3が1.0/17倍、MR level 4が1.0/15倍である。さらにExtendedは変調やMU値が結果的に増加することもあり、治療計画が複雑化することが懸念されるので、後述する治療計画を簡易化するAperture Shape Controller (ASC) と組み合わせた方がよいかもしれないとも記載されている²⁾。MR levelとは、線量計算を高速化させるために少ない門数から順次門数を増やし最適化させるためのMLC control pointの数を表し、level 1=10個:level 2=20個:level 3=40個:level 4=80個である。Convergence Modeの使用により、VMATの治療計画最適化による線量が目標とした線量制約に近づくよう改善されることが示唆されている。

ASCは、VMAT治療計画時のリーフ配列決定に関する新しいツールであり、EclipseのVer. 15.6より実装された。ASCはmultileaf collimator (MLC) の開口サイズを大きくし複雑さを低減するために使用され、ASCを使用しない設定のOffを除くと強度の低い方から5段階 (Very Low, Low, Moderate, High, Very High) にASCの強度を設定できる²⁾。なお、ASCは隣接したMLC先端の位置に基づいて計算されたゼロ曲線からの偏差に対して違反を設定し、PTVやOARに対する制約と競合し目的に対する適切な解答が計算される。そのためASCの強度を高めるとPTVやOARに対する制約が相対的に緩くなる³⁾、開口サイズを大きくすることができる²⁾。なお、ASCをVery Low, Low, Moderateを用いた場合、線量指標においてOffと同等の計画が作成でき、かつ照射野形状の複雑さは低減しMU値の減少が見られたことから、ASCの有用性が示されたとして上間らが報告している³⁾。

ASCを使用することで、検証結果が良くなかった治療計画で検証結果が改善したという報告もされている⁴⁾。現在のところConvergence Modeの設定を変化させた際に治療計画にどのように影響するかという

報告は一つしかなく⁵⁾、機能の有用性を報告している。しかし、Convergence Modeの設定をExtendedにしたときに不良なプランが作成され、Extendedを使用した場合を報告していない。Convergence Modeの設定を変化させた際に線量指標が改善することを期待するが、有意に変化することを報告し、さらに計算にかかる時間がどの程度増加するかを示すことは臨床において有用であると考えられる。

本研究の目的は、Convergence Modeの設定を変化させた際に複数の条件下において、線量制約を設定した輪郭の線量指標が改善することを示すことである。

2. 方法

2-1 使用機器と設定、および対象

2-1-1 使用機器と設定

RTPSおよび線量計算アルゴリズムは、Eclipse Ver. 15.6においてAcuros External Beam Ver. 15.6.06 (AXB) を使用し、dose to mediumを計算するためphysical material tableにAcurosXB-13.5を使用した。リニアックにはNovalis Tx[®] (BRAINLAB AG) を使用した。

プラン作成時の設定に関して、幾何学的角度は前立腺を対象とした放射線治療計画では、ガントリー回転角度時計回り方向 (clock wise: CW) の181-179°でコリメーター角度はそれぞれ30°に設定した1 arc照射を計画した。その他の部位では、上記した照射フィールドにガントリー回転角度反時計回り (counter clock wise: CCW) の179-181°でコリメーター角度330°の照射フィールドを追加した2 arc照射で計画した。なお、MLCパラメーターはdosimetric leaf gapに0.16 cm、transmission factorに1.3%を使用した。

次に、VMAT Optimizationにはgraphics processing unit (GPU) 利用下でPhoton Optimizer (PO) Ver. 15.6.06を使用した。X線は6 MV-X線を線量率600 MU/minで設定した。またMU Objectiveおよびjaw trackingは使用せず、Structure ResolutionはNormal (2.5 mm) に設定した。

線量分布計算の設定に関して、線量計算グリッドは2.0 mmに設定し、回転照射における線量計算を行うガントリー角度の分解能を1°に設定した。

2-1-2 対象

治療計画を実施する画像および輪郭は、American Association of Physicists in Medicine (AAPM)

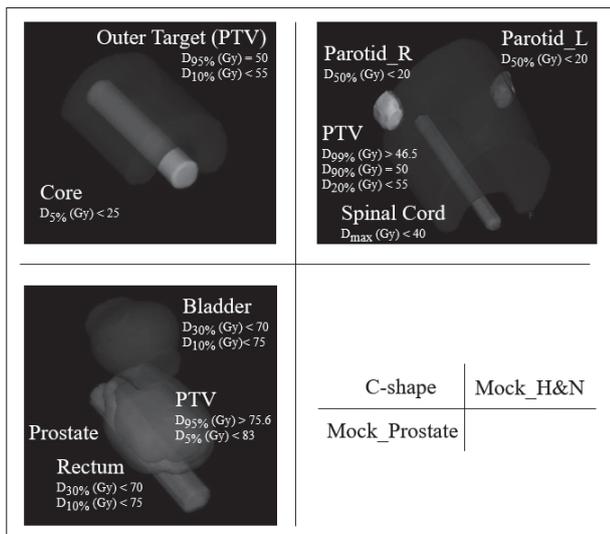


Fig.1 The Image of Mock structure and each dose constraint.

のTask Group 119 (TG-119) で提示されている3種類のMock structureと臨床画像を使用した。

Mock structureに関して、C-shape, Mock_H&N, Mock_Prostate(Fig.1)を使用した。Mock structureは、Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) 情報としてインターネットよりダウンロード可能で、IMRTの試運転を確認するために作成されたものである⁶⁾。Mock structureはPTV(Outer target含む)やOARの位置関係や体積が既知であり、誰もが取得できる画像情報である。臨床画像では線量勾配がどの程度で達成できる計画であるかを伝えることは困難だが、Mock structureならば容易である。またそれぞれのMock structureごとに線量目標がGoalとして設定されている。なお、Fig.1にGoalとして設定されている輪郭の外観と線量目標を記載した。PTVに該当するstructureには処方線量を記載し、OARに該当するstructureには低減目標の線量制約を記載した。また臨床画像でも検討を行ったが、臨床画像はC-shapeと比較するための部位を腰椎とし、またMock_H&Nと比較するための部位を頸部とし、最後にMock_Prostateと比較するための部位を前立腺とした。それぞれ5例ずつを対象とした。

2-2 治療計画

2-2-1 Mock structureを使用した治療計画

それぞれのStructureに対してCase 1から3まで、3種類の治療計画を作成した。線量制約はGoalを設定されているstructureと体輪郭のみに設定した。

Table 1に、設定した線量制約を記載した。Caseを1-3まで作成したが、Case 1はGoalを満たす線量制約を設定しており、本研究内で作成される治療計画の中では線量勾配が平坦な治療計画であり、ASCをOffに設定した。次に、Case 2はCase 1に比べOARに対して線量制約が厳しく、線量勾配が急峻な治療計画であり、ASCをOffに設定した。線量制約を厳しくしたものは各部位において1種類であり、C-ShapeではCoreを、H&Nでは両側のParotidを、ProstateではRectumを設定した。全ての線量制約を厳しくするより、臨床で線量低減対応が求められる頻度の高い臓器の線量を下げような設定とした。またCase 3はCase 2と同様の線量制約設定でASCの設定のみを変更し、Moderateに設定した。これらの治療計画の線量指標がGoalを満たしているか評価した。

以下に、3種類のCaseを作成した理由を説明する。本研究はConvergence Modeを変化させた際に治療計画にどのように影響するかということを示すために行っていた。Case 2はCase 1と異なる線量制約下において、Convergence Modeの設定を変化させたときの線量指標の違いを検討するためである。最後に、Case 3はASCをModerateに設定したときにおいて、Convergence Modeの設定を変化させたときの線量指標の違いを検討するためである。またCase 2に比べて治療計画が単純になりMU値が低減していることを検討するためである。

次に、指標の評価を行った。Convergence Modeの設定を変化させたときに、Convergence Modeの設定がOffのときと比べ、PTVの指標およびOARの線量指標が改善・不変・悪化の3通りで評価した。なお、PTVの指標にはhomogeneity index (HI)⁷⁾、Conformity Index (CI)、Gradient Measure (GM) およびGoalに設定されている線量指標を対象とし、OARの線量指標には各structureのGoalに設定されている線量指標を評価した。評価方法は、HI、GM、OARの線量指標およびPTVの最大線量制約については数値が小さくなった場合を改善とした。CIにおいては1に近づいた場合を改善とし、PTVの最小線量制約については数値が大きくなった場合を改善とした。

なお、HI、CI、GMは次式を使用し算出した。

$$HI = D_{2\%}(Gy) / D_{98\%}(Gy)$$

$$CI = V_{100\%}(PTV)(cc) / V(PTV)(cc)$$

$$GM = \left| \frac{\text{Equivalent radius(cm) of } V_{100\%}(cc)}{\text{Equivalent radius(cm) of } V_{50\%}(cc)} \right|$$

次に、MU値の評価を行った。Convergence Modeの設定を変化させ治療計画を作成し、同一のConvergence Modeの設定で作成された治療計画で処方されたMU値の平均を計算した。さらにASCによるMU値の低減を評価するため、Case 2とCase 3で処方されたMU値を比較した。

計算時間の計測について、Case 1から3に関する計算時間は最適化時間、次にIntermediate Doseの計算時間、さらにIntermediate Doseの結果を反映した最適化時間、最後に線量分布の計算時間を足し合わせたものである。

2-2-2 臨床画像を使用した治療計画

臨床画像より各部位に対し5例を選び、2-2-1と同

様の方法を行った。使用した画像以外は処方線量や線量制約など全て2-2-1と同じ設定で行った。ただし、Goalに設定されている線量指標を満たしているかの評価は幾何学的配置が異なるので行わなかった。Convergence Modeの評価として、Convergence Modeの設定がOffのときと比べ、PTVの指標およびOARの線量指標を評価した。臨床画像では5例に対して検討しているため、線量指標とMU値の評価をConvergence ModeがOffのときと比較し、Convergence Modeの変化における線量指標とMU値の変化について有意差検定を行った。有意差検定は対応のあるデータとしてt検定を行い、両側検定で $p < 0.05$ を有意とした。

設定した体輪郭をFig.2に示す。

Table 1 Dose constraints and priorities for each structure

In C-shape, NTO was set to OFF. In H & N and Prostate, the NTO was set to "100 / Automatic NTO". Case 1 and Case 2 were optimized without using MCO with ASC set to OFF. Case 3 was optimized with ASC set to Moderate. Priority and setting are described in the Normal Tissue Objective (NTO) line.

Test Patten	Structure	Type	Case					
			Case 1			Case 2, 3		
			Vol (%)	Dose (Gy)	Priority	Vol (%)	Dose (Gy)	Priority
C-Shape	OuterTarget (PTV)	Upper	0	50.0	300	0	50.0	300
		Lower	100	50.0	300	100	50.0	300
		Mean		50.0	300		50.0	300
	BODY	Upper	0	50.3	700	0	50.3	700
		NTO		Off			Off	
	Core	Upper	0	25.0	250	0	20.0	250
Mean			13.0	250		7.0	250	
(Mock_)H&N	PTV	Upper	0	50.0	300	0	50.0	300
		Lower	100	50.0	300	100	50.0	300
	BODY	Upper	0	50.5	700	0	50.5	700
		NTO		100/Automatic	100		100/Automatic	100
	Cord	Upper	0	35.0	250	0	35.0	250
	Parotid_L	Upper	0	50.0	250	0	50.0	250
		Mean		18.0	250		13.0	250
	Parotid_R	Upper	0	50.0	250	0	50.0	250
		Mean		18.0	250		13.0	250
(Mock_)Prostate	PTV	Upper	0	77.0	500	0	77.0	500
		Lower	100	75.6	400	100	75.6	400
	Prostate	Lower	100	76.0	300	100	76.0	300
	PTV_Low	Upper	0	75.6	500	0	75.6	500
	Rectum	Upper	0	75.6	250	0	75.6	350
		Upper	5	74.0	300	5	74.0	400
		Upper	15	70.0	400	10	70.0	200
		Upper	30	60.0	400	20	60.0	400
		Mean		40.0	250		30.0	350
	Bladder	Upper	10	60.0	250	10	60.0	250
		Upper	30	41.0	250	30	41.0	250
	BODY	Upper	0	77.0	700	0	77.0	700
		NTO		100/Automatic	100		100/Automatic	100

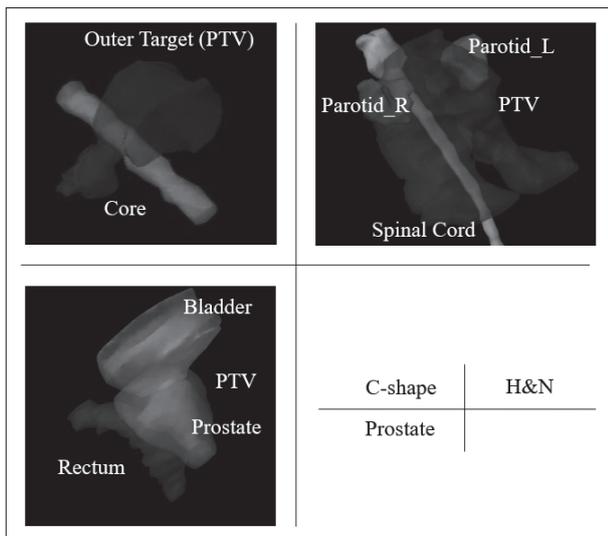


Fig.2 clinical images (C-shape, Mock_H&N, Mock_Prostate).

本研究は、施設の倫理委員会より承認を受けた（承認番号：2020-08）。

3. 結果

3-1 Mock structureを使用した治療計画

Case, Mock Structure, Convergence Modeの強度ごとの線量指標をTable 2に示した。作成した27治療計画全てがGoalに設定されている線量指標を満たしていた。Convergence Modeの評価に関して、PTVの線量指標について述べる。PTVの線量指標は線量均一性に関わるHIやD_{0%}(Gy)と、PTVと正常組織の線量バランスを示すCI, GMと別に述べる。

まず、PTVの線量均一性に関わる線量指標において、OnではOffと比べ、21項目中15項目（各Caseにおいて7項目中Case 1で5項目、Case 2で5項目、Case 3で5項目）で改善しており、残りの6項目

Table 2 Dose index of structure with Goal specified in Mock structure

In the target structure, the dose index corresponding to HI and the target dose is described. In addition, D_{max} and D_{mean} and the dose index corresponding to the target dose are described in OAR.

Test Patten	Structure or MU	Dose	Case								
			Case 1			Case 2			Case 3		
			Convergence Mode								
			Off	On	Extended	Off	On	Extended	Off	On	Extended
C-Shape (D95=50 Gy)	OuterTarget (PTV)	HI	1.06	1.05	1.04	1.11	1.11	1.07	1.10	1.09	1.07
		CI	1.09	1.11	1.10	1.24	1.33	1.16	1.16	1.19	1.15
		GM	2.30	2.43	2.38	2.19	2.23	2.37	2.32	2.32	2.30
	Core	D _{10%} (<55.0)	51.7	51.3	51.2	53.3	53.0	51.8	52.6	52.6	51.8
		D _{max}	28.1	27.2	26.9	25.6	24.9	22.7	24.1	23.4	22.2
		D _{10%} (<25.0)	23.4	23.1	22.3	18.9	18.5	16.6	18.3	18.0	16.5
	MU	698	686	802	732	703	771	705	689	740	
Mock_H&N (D90=50 Gy)	PTV	HI	1.07	1.05	1.05	1.07	1.06	1.06	1.07	1.07	1.06
		CI	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.93	0.93	0.94
		GM	2.55	2.44	2.46	2.47	2.42	2.41	2.47	2.65	2.39
	Cord	D _{99%} (>46.5)	48.2	48.5	48.7	47.4	48.0	48.2	47.4	47.5	48.2
		D _{20%} (<55.0)	51.3	51.0	51.0	51.4	51.2	51.2	51.4	51.2	51.2
		D _{max} (<40.0)	37.4	37.1	36.8	37.8	37.1	36.6	38.0	37.7	37.3
	Parotid_L	D _{mean}	18.9	18.6	18.3	15.0	14.8	14.8	15.0	14.7	14.6
		D _{mean}	18.7	18.6	18.2	14.8	14.4	14.3	14.7	14.6	14.2
	MU	570	578	734	552	556	605	538	550	603	
Mock_Prostate (D95=75.6 Gy)	PTV	HI	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.03	1.04	1.03	1.03
		CI	1.00	1.02	1.02	1.07	1.07	1.09	1.05	1.06	1.06
		GM	1.50	1.48	1.52	1.49	1.46	1.47	1.50	1.69	1.57
	Rectum	D _{5%} (<83.0)	77.1	77.1	76.9	77.8	77.4	77.4	77.6	77.4	77.1
		D _{30%} (<70.0)	60.9	60.9	60.5	45.4	44.9	44.8	46.0	45.0	44.9
		D _{10%} (<75.0)	74.9	74.9	74.7	74.6	74.6	74.6	74.7	74.6	74.5
	Bladder	D _{30%} (<70.0)	39.6	34.2	37.8	30.4	34.4	31.3	30.3	34.3	27.1
		D _{10%} (<75.0)	60.9	55.9	59.1	60.9	60.8	58.2	58.4	58.2	55.0
	MU	539	533	520	698	711	786	650	660	673	

(Case 1で2項目, Case 2で2項目, Case 3で2項目)は不変であり悪化したものはなかった。Extendedでは, 21項目中20項目 (Case 1で6項目, Case 2で7項目, Case 3で7項目)で改善しており, Case 1の1項目は不変であった。次に, CIはOnではOffと比べ, 9項目中4項目で不変であり5項目で悪化し, Extendでは, 9項目中2項目で改善し1項目で不変であり6項目で悪化していた。またGMはOnではOffと比べ, 9項目中4項目で改善し1項目で不変であり4項目で悪化し, Extendでは, 9項目中5項目で改善し4項目で悪化していた。OARにおいて, OnではOffと比べ, 27項目中22項目 (各Caseにおいて9項目中Case 1で7項目, Case 2で7項目, Case 3で8項目)で改善しており, 3項目 (Case 1で2項目, Case 2で1項目)は不変で, 2項目 (Case 2で1項目, Case 3で1項目)は悪化していた。ExtendedではOffと比べ, 27項目中25項目 (各Caseにおいて9項目中Case 1で9項目, Case 2で7項目, Case 3で9項目)で改善しており, 1項目 (Case 2で1項目)は不変で, 1項目 (Case 2で1項目)は悪化していた。

次に, MU値に関して結果を報告する。Convergence Modeの設定がOffのときのMU値の平均は 631 ± 81 MUで, OnのときのMU値の平均は 630 ± 74 MUで, ExtendedのときのMU値の平均は 693 ± 98 MUであった。Case 2とCase 3における治療計画最適化同一条件でASCをかけた時のMU値の低減率は, Convergence Modeの設定がOnのときに3.6%であり, Extendedのときには6.7%であった。

またCase 1からCase 3における, Mock Structure, Convergence Modeごとの計算時間をTable 3に示

Table 3 Calculation time when changing the intensity of Convergence Mode using Mock structure

The time in this table is the time until the final dose distribution is displayed after optimization.

Test Patten	Convergence Mode	Time taken to create a plan (min)		
		Case 1	Case 2	Case 3
C-Shape	Off	5	6	13
	On	13	14	18
	Extended	41	46	77
Mock_H&N	Off	10	13	13
	On	24	30	33
	Extended	103	152	203
Mock_Prostate	Off	4	5	7
	On	9	11	18
	Extended	35	44	61

した。Convergence ModeがOffのときと比べOnのときでは 2.3 ± 0.4 倍の時間がかかり, Extendedのときは 9.5 ± 2.8 倍の時間がかかった。

3-2 臨床画像を使用した治療計画

Case, Mock Structure, Convergence Modeの強度ごとの線量指標をTable 4に示した。Convergence Modeの評価に関して有意差があったものの数を報告する。有意差があったものは全て改善方向に変化していた。PTVの線量均一性に関わる線量指標において, OnではOffと比べ, 21項目中14項目 (各Caseにおいて7項目中Case 1で3項目, Case 2で7項目, Case 3で4項目)で有意に改善していた。Extendedでは, 21項目中20項目 (Case 1で7項目, Case 2で7項目, Case 3で6項目)で有意に改善していた。CI, GMについて有意な差があるものはなかった。次にOARにおいて, OnではOffと比べ, 27項目中13項目 (各Caseにおいて9項目中Case 1で4項目, Case 2で5項目, Case 3で4項目)で有意に改善し, ExtendedではOffと比べ, 27項目中17項目 (各Caseにおいて9項目中Case 1で6項目, Case 2で7項目, Case 3で4項目)で有意に改善していた。

次に, MU値に関して, Table 4に示すようにConvergence Modeの設定がOnのときに9項目中5項目でMU値の増加を有意に認め, Extendedのときには9項目中9項目でMU値の増加を有意に認めた。Case 2とCase 3における治療計画最適化同一条件でASCを設定した時のMU値の低減率は, Convergence Modeの設定がOffのときに2.3%, Onのときに3.7%で, Extendedのときに7.8%であった。

またMCOを使用しなかったときのCase 1からCase 3における, Mock Structure, Convergence Modeごとの計算時間をTable 5に示した。Convergence ModeがOffのときと比べ, Onのときでは 2.2 ± 0.4 倍の時間がかかり, Extendedのときは 10.6 ± 2.37 倍の時間がかかった。

4. 考察

本研究では, Convergence Modeの設定を変化させた際に複数の条件下において, 線量制約を設定した輪郭の線量指標が改善することを示すことが目的である。しかし, Convergence Modeの設定強度を上げたときに, 全ての線量指標で同等以上に改善されるわけではなかった。複数のCaseでConvergence

Table 4 Evaluated structure and dose index

The comparison of dose index and MU evaluates On and Extended for when Convergence Mode is Off.

Test Patten	Structure or MU	Dose	Case								
			Case 1			Case 2			Case 3		
			Convergence Mode			Convergence Mode			Convergence Mode		
			Off	On	Extended	Off	On	Extended	Off	On	Extended
C-Shape (D95=50 Gy)	OuterTarget (PTV)	HI	1.06 ± 0.02	1.05 ± 0.02*	1.04 ± 0.02*	1.10 ± 0.06	1.07 ± 0.04*	1.07 ± 0.04*	1.09 ± 0.06	1.07 ± 0.04	1.07 ± 0.04*
		CI	1.15 ± 0.06	1.13 ± 0.05	1.13 ± 0.03	1.20 ± 0.03	1.17 ± 0.04	1.17 ± 0.06	1.18 ± 0.04	1.17 ± 0.04	1.17 ± 0.04
		GM	1.31 ± 0.22	1.34 ± 0.19	1.38 ± 0.26	1.28 ± 0.21	1.33 ± 0.20	1.44 ± 0.26	1.29 ± 0.21	1.41 ± 0.22	1.40 ± 0.22
	Core	D _{10%} (<55.0)	51.7 ± 0.5	51.4 ± 0.3	51.3 ± 0.4*	52.2 ± 1.1	51.5 ± 0.6*	51.8 ± 1.1*	52.2 ± 0.7	51.5 ± 0.6*	51.7 ± 0.8*
		D _{max}	30.5 ± 3.1	30.1 ± 2.9*	29.9 ± 2.8*	28.1 ± 5.7	27.5 ± 5.5*	27.2 ± 5.5*	28.1 ± 5.7	27.5 ± 5.5*	27.0 ± 5.1*
		D _{10%} (<25.0)	22.8 ± 0.7	22.0 ± 0.9*	21.2 ± 1.3*	17.1 ± 2.9	15.4 ± 1.3	14.8 ± 0.8	16.6 ± 2.6	15.4 ± 1.3	15.1 ± 0.5
MU		718 ± 89	759 ± 118*	941 ± 237*	768 ± 36	824 ± 81	880 ± 75*	778 ± 50	831 ± 87*	887 ± 85*	
H&N (D90=50 Gy)	PTV	HI	1.08 ± 0.01	1.07 ± 0.01	1.06 ± 0.00*	1.10 ± 0.03	1.09 ± 0.03*	1.08 ± 0.03*	1.10 ± 0.03	1.09 ± 0.03*	1.08 ± 0.03*
		CI	0.98 ± 0.02	0.97 ± 0.02	0.98 ± 0.02	1.00 ± 0.05	1.00 ± 0.04	1.01 ± 0.06	1.01 ± 0.05	1.01 ± 0.05	1.00 ± 0.04
		GM	3.05 ± 0.38	3.02 ± 0.38	3.06 ± 0.34	2.94 ± 0.23	3.06 ± 0.33	3.17 ± 0.49	3.00 ± 0.27	3.18 ± 0.42	3.13 ± 0.33
		D _{95%} (>46.5)	47.8 ± 0.1	47.8 ± 0.0	48.0 ± 0.1*	47.0 ± 0.9	47.2 ± 0.8*	47.3 ± 0.8*	46.9 ± 1.0	47.0 ± 1.0*	47.2 ± 0.7*
	Cord	D _{20%} (<55.0)	51.5 ± 0.0	51.3 ± 0.1*	51.2 ± 0.1*	51.8 ± 0.5	51.6 ± 0.4*	51.5 ± 0.4*	51.8 ± 0.5	51.6 ± 0.4*	51.8 ± 0.6
		D _{max} (<40.0)	38.4 ± 0.2	38.0 ± 0.4	37.8 ± 0.3*	39.1 ± 0.9	38.7 ± 0.9*	38.5 ± 0.7*	39.0 ± 0.6	39.3 ± 0.5*	38.3 ± 0.9*
	Parotid_L	D _{mean}	18.5 ± 0.3	18.3 ± 0.2*	18.3 ± 0.1*	14.4 ± 1.6	14.2 ± 1.5*	14.0 ± 1.4*	14.3 ± 1.5	14.2 ± 1.5*	14.0 ± 1.3*
	Parotid_R	D _{mean}	18.4 ± 0.2	18.3 ± 0.2*	18.3 ± 0.3*	14.0 ± 0.9	13.8 ± 0.8*	13.8 ± 1.0*	14.0 ± 1.0	13.8 ± 0.9*	14.0 ± 1.3
	MU		472 ± 64	496 ± 80	525 ± 80*	504 ± 71	534 ± 61	552 ± 61*	483 ± 60	490 ± 75	413 ± 235*
	Prostate (D95=75.6 Gy)	PTV	HI	1.05 ± 0.01	1.04 ± 0.01*	1.04 ± 0.01*	1.05 ± 0.01	1.04 ± 0.01*	1.03 ± 0.01*	1.05 ± 0.01	1.05 ± 0.01
CI			1.00 ± 0.02	1.01 ± 0.01	1.01 ± 0.01	1.02 ± 0.02	1.02 ± 0.02	1.03 ± 0.01	1.02 ± 0.02	1.03 ± 0.02	1.03 ± 0.03
GM			1.48 ± 0.05	1.47 ± 0.07	1.48 ± 0.04	1.53 ± 0.14	1.64 ± 0.13	1.70 ± 0.20	1.64 ± 0.10	1.66 ± 0.13	1.68 ± 0.14
Rectum		D _{5%} (<83.0)	78.2 ± 0.6	77.9 ± 0.5*	77.8 ± 0.5*	78.2 ± 0.4	77.9 ± 0.3*	77.6 ± 0.1*	78.3 ± 0.4	78.1 ± 0.3	78.0 ± 0.3*
		D _{30%} (<70.0)	58.2 ± 3.7	55.6 ± 2.1	55.1 ± 2.5	41.7 ± 1.8	41.2 ± 1.7*	41.3 ± 1.9*	41.7 ± 2.0	41.5 ± 1.6	40.7 ± 0.9
Bladder		D _{10%} (<75.0)	75.5 ± 0.4	75.4 ± 0.3	75.5 ± 0.4	75.0 ± 0.9	75.0 ± 0.2	74.9 ± 0.3	75.0 ± 0.7	74.7 ± 1.0	74.7 ± 1.0
		D _{30%} (<70.0)	35.5 ± 12.9	35.5 ± 12.6	33.7 ± 13.5*	32.5 ± 14.6	31.7 ± 15.4	30.5 ± 16.7*	32.3 ± 15.0	31.1 ± 15.3	31.6 ± 15.6
MU			69.8 ± 6.0	68.4 ± 7.2	68.4 ± 7.2	68.7 ± 7.2	68.5 ± 7.4	68.3 ± 7.6*	68.6 ± 7.2	68.6 ± 7.1	68.5 ± 7.1*
MU		469 ± 45	544 ± 48*	547 ± 50*	555 ± 19	584 ± 22*	589 ± 28*	530 ± 12	549 ± 5*	562 ± 21*	

*P<0.05

Table 5 Calculation time when changing the intensity of Convergence mode using clinical image

The time in this table is the time until the final dose distribution is displayed after optimization.

Test Patten	Convergence Mode	Time taken to create a plan (min)		
		Case 1	Case 2	Case 3
C-Shape	Off	6 ± 2	6 ± 1	10 ± 3
	On	15 ± 3	16 ± 3	20 ± 4
	Extended	79 ± 41	95 ± 54	123 ± 46
H&N	Off	23 ± 4	23 ± 4	29 ± 2
	On	44 ± 2	45 ± 2	57 ± 3
	Extended	226 ± 6	235 ± 30	337 ± 19
Prostate	Off	6 ± 2	9 ± 2	11 ± 1
	On	17 ± 3	18 ± 2	24 ± 2
	Extended	76 ± 16	75 ± 13	110 ± 22

Modeの設定を変化させたので、場合ごとに線量指標などの変化を考察する。

最初に、Mock Structureを使用した治療計画について述べる。Goalに設定されている線量と目標としている線量を同一にすれば、PTVとOARの目

標に対して、違反量の総和を少なくしようとするので、OARのGoalを達成しなくなる可能性があり強い線量制約を設定した。Mock_ProstateのBladderにおいて、Convergence Modeの設定強度と線量指標の改善が一致しなかった。これは治療計画時に設定した線量制約をConvergence Modeの設定がOffのときにすでに達成できている場合に起こっている。OARに課した線量制約を達成できている場合に、目標未達成であるHIを改善させようとした結果であり、OARの改善は達成済みのため積極的には行われない。これは前述した線量最適化時の違反の総和が最小になる結果を計算されたと考える。このことより、Convergence Modeの設定がOffのときに、治療計画時に設定した線量指標の線量制約を達成している場合、Convergence Modeの設定を強くしたときに達成していた線量指標が悪化する可能性がある。しかし、HIが悪化することなくConvergence Modeの設定がOnのとき、Offと比べ27項目中22項目が改善され、Extendedのとき27項目中25項目改善されていた。それらは全体的に線量指標が改善された

結果と考える。またMU値に関してConvergence Modeの設定強度に比例しMU値が上昇し、ASCをModerateに設定するとMU値が減少すると考えていたが、Convergence Modeの強度とMU値の比例関係は必ずしも成立するわけではなかった。しかし、ASCをModerateに設定したときのMU値低下は、数MUの差しかない場合もあったがこの実験内では成立していた。最適化時間に関しては、Convergence Modeの設定がOnのときOffと比べ1.2から3倍長くなると記載されていたが、 2.3 ± 0.4 倍と記載通りの時間であり、Extendedに設定したときは 9.5 ± 2.8 倍であった。

次に、臨床画像を使用した治療計画について述べる。C-ShapeのCoreにおける D_{10} (Gy)や、ProstateではRectumやBladderでConvergence Modeの強度と線量指標の改善が有意に示されなかった。線量制約が直接強く設定されていない線量指標に関しては設定に則した結果と考える。Mock Structureのときと同様に、治療計画時に設定した線量制約の線量指標よりも線量分布計算後の線量指標が低い場合は、Convergence Modeの設定強度と線量指標の改善が一致しなかった。今回の臨床画像での検証は、Mock structureを使用した検証と同じ線量制約を使用しているため、PTVとOARの幾何学的配置が近接しているため達成不可能な線量制約も存在する。H&NにおいてParotid_RはParotid_Lに比べて D_{mean} (Gy)の線量指標に差があったが、今回のように両方が線量制約を達成できていない場合、Convergence Modeの設定強度を上げるに従い、両者の違反量が近接した場合もあった。その場合、有意差ありという結果になっているものの、一方の耳下腺の線量指標が悪化している症例も存在した（Convergence Modeの設定がOffのとき、Parotid_Rの D_{mean} が14.8Gy、Parotid_Lの D_{mean} が13.2Gyであったが、Convergence Modeの設定をExtendにしたとき、それぞれ13.7Gyに改善、13.5Gyに悪化した場合があった）。このように、Convergence Modeの強度を上げると設定した線量制約に対して線量指標が違反している場合でも違反量をそろえ、総ペナルティーが少ない状況を計算していると考えられる。またHIが悪化することなくConvergence Modeの設定がOnのとき、Offと比べ27項目中13項目が改善され、Extendedのときに27項目中17項目改善されたことは、全体的に線量指標が改善された結果と考える。本研究を行っている際に、一番臨床における意義を感じたことはHIの改善

である。HIが0.01小さくなるということはPTVの最小線量が1%上がる、もしくは最大線量が1%下がることを意味する。相対的に高いPriorityを設定していることもあり、良く改善したと感じている。PTVと正常組織の線量バランスを示すCI、GMに関しては特筆すべき有意な変化はなく、Convergence Modeの設定とは関連が少ないと考える。またMU値に関してConvergence Modeの設定強度に比例しMU値が上昇し、ASCをModerateに設定するとMU値が減少するという考え通りの挙動を示していた。最適化時間に関しては、Convergence Modeの設定がOnのとき、Offと比べ 2.2 ± 0.4 倍と記載通りの時間であり、Extendedに設定したときは 10.6 ± 2.4 倍であった。MCOを使用したときの計算時間は、Convergence Modeの設定がOnのとき、Offと比べ 2.7 ± 0.3 倍となり、Mock Structureのときと大差なかった。

完成した治療計画の線量指標は、Case 1からCase 3でConvergence Modeの強度を上げると有意に改善した線量指標が増えたことにより、Convergence Modeは線量分布を改善すると言える。Case 2とCase 3の比較を記載する。Convergence Modeの設定がOnとExtendedのとき、OARの線量指標においてCase 2では有意に改善を認めたものが、Convergence ModeをOnに設定したとき9項目中5項目、Convergence ModeをExtendedに設定したとき9項目中7項目であった。またCase 3ではConvergence ModeをOnに設定したとき9項目中4項目、Convergence ModeをExtendedに設定したとき9項目中4項目と減少した。これらはASCによる影響と考える。ASCをModerateに設定することでMU値は減少したが、線量指標の改善数低下は、達成すべき目標の中にASCの要素が含まれ相対的にOARなどの線量指標に対する優先度が低下したと考えられる。

次に、計算時間に関して述べる。Convergence Modeの設定強度を変えた場合の計算時間の延長率は、治療計画ごとに統一性がなかった。これは線量制約設定数や、線量制約が達成しにくいかどうか、門数などに依存していると考えられるが、Extendedを使用すると、今回の結果では最長で331分の計算時間を要した治療計画が存在した。しかし、線量指標は改善するので時間とのトレードオフを考え、どの程度の時間がかかるか予測できれば実際に使用しやすいと考える。

われわれは、今回の研究に限界点があることを認識している。Convergence Modeの設定を強くすることで治療計画が複雑になり、どの程度まで治療計画

が複雑化すれば患者個別品質保証で照射不可能な計画になるかは分かっていない。ただし、患者個別品質保証結果が悪いときにASCを使用することで検証結果が改善する報告⁴⁾もあり、対策は存在している。Convergence Modeの設定トレードオフ線量分布調整のDVHを変更できる可動範囲は、経験則では増えているが報告する方法がなく困難である。

Rossiらが報告した⁵⁾、Convergence Modeの設定をExtendedにした時のHIが極端に悪くなるような例は発生せず、急峻な線量勾配が必要な際の治療計画において、特にHIとOARの線量指標を向上させるExtendedをわれわれは有用と考える。

今回、Convergence Modeの設定強度を変化させ、大部分の線量指標が改善することが確認できたこと、改善しない線量指標の特徴を報告できたことは、今後の放射線治療計画の質向上に寄与できると考える。また計算に要する時間を報告することにより、時間配分の参考になれば幸いである。

5. 結 語

VMAT治療計画において、Convergence Modeの設定を変化させた際に複数の条件下において、線量制約を設定した輪郭の線量指標が改善した。

謝 辞

本稿作成に当たりご協力いただいた済生会吹田病院の遠山隆昭氏をはじめ、スタッフの方々に感謝申し上げます。

利益相反

開示すべき利益相反はない。

表の説明

Table 1	Structureごとの線量制約と優先度 C-shapeではNTOをOFFに設定した。H&NおよびProstateではNTOを“100/Automatic NTO”に設定した。Case 1およびCase 2はASCをOFFに設定し、MCOを使用せず最適化した。Case 3はASCをModerateに設定し最適化した。Normal Tissue Objective (NTO) の行には優先度および設定を記載した。
Table 2	Mock structureにおけるGoalが指定されているstructureの線量指標 ターゲットとしているstructureではHIと目標線量に対応する線量指標を記載した。またOARには D_{max} と D_{mean} と目標線量に対応する線量指標を記載した。
Table 3	Mock structureを使用したConvergence Modeの強度を変化させた際の計算時間 この表における時間とは最適化を行い最終線量分布が表示されるまでの時間である。
Table 4	評価したstructureと線量指標 線量指標およびMUの比較はConvergence ModeがOffのときを対象としてOn, Extendedを評価している。
Table 5	臨床画像を使用したConvergence modeの強度を変化させた際の計算時間 この表における時間とは最適化を行い最終線量分布が表示されるまでの時間である。

図の説明

Fig.1	Mock structure (C-shape, Mock_H&N, Mock_Prostate) とそれぞれの線量制約
Fig.2	臨床画像 (C-shape, Mock_H&N, Mock_Prostate)

参考文献

- 1) Karl O: Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Med Phys*, 35(1), 310-317, 2008.
- 2) TPS New Features Workbook 15.5. ©2017 Varian Medical Systems, Inc. All right reserved. (2020/3/20 my Varianより入手)
- 3) 上間達也, 他: 照射野開口形状コントローラが上咽頭がんVMAT治療計画に与える影響について. *日放技学誌*, 76(4), 356-365, 2020.
- 4) 中村浩幸, 他: 照射野開口コントローラの設定が患者個別品質保証に与える影響. *日放技学誌*, 78(2), 188-199, 2022.
- 5) Majja Rossi, et al.: The use of aperture shape controller and convergence mode in radiotherapy treatment planning. *Journal of Radiotherapy in Practice*, page 1 of 8. doi: 10.1017/S1460396920001028.
- 6) Ezzell GA, et al.: IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119. *Med Phys*, 36(11), 5359-5373, 2009.
- 7) 日本放射線腫瘍学会QA委員会: 体幹部定位放射線治療ガイドライン, 線量分布の評価指標 (D95, V20, HI, CI). *日放線腫瘍学会誌*, 18(1), 1-17, 2006.