

# Radixact Synchronyの 使用経験

杉江愛生

日本赤十字社愛知医療センター名古屋第二病院 放射線科

Key  
Words

●Synchrony ●Radixact

Synchronyは、追尾照射をRadixactにて呼吸性移動対策として使用可能とした待望のシステムであり、照射前～中のkV画像撮影とSynchronyカメラ・LEDマーカによる呼吸波形取得により呼吸位相と標的位置の相関モデルを作成し、マーカレスにて非侵襲的にターゲットの判別・追尾・検出・照射を行うことができる。Synchronyにて、従来より大幅に線量分布が改善するため、より安全な放射線治療を行うことができ、当施設のこれまでの臨床使用症例はいずれも経過良好である。

## はじめに

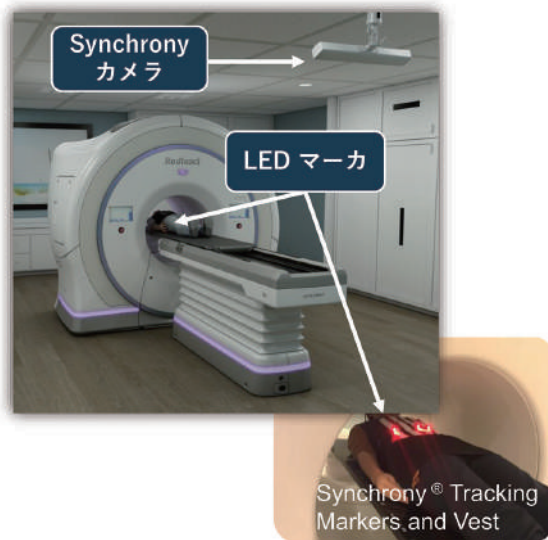
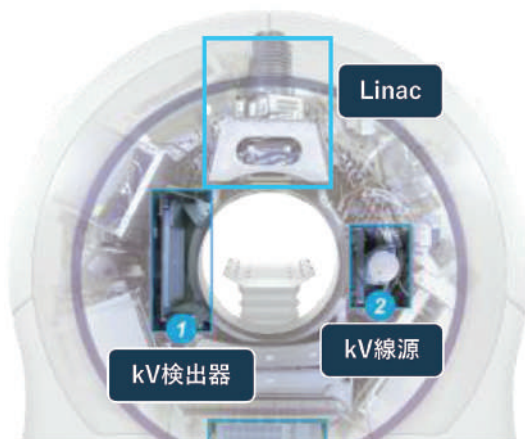
Radixactは、Binary MLCを用いたヘリカル回転照射をベースとした高いIMRT (Intensity-Modulated Radiation Therapy: 強度変調放射線治療)性能を誇るトモセラピーシリーズの後継機種である。トモセラピーの高いIMRTの性能に加え、線量率の向上やMV (Megavoltage)-CTの性能向上による照射時間の短縮、カウチキャッチャー導入による位置精度の向上、Dynamic Jawを用いたTomo EDGE機能による線量分布の改善、など多方面の性能が向上したRadixactは、高精度かつ高い汎用性を有するきわめて優れた放射線治療装置として評価が確立され、多くの施設で導入されている。

当施設はかつて2006年5月にわが国で3番目にトモセラピーを導入しており、国内でも有数のトモセラピー使用経験を有している施設である。その経験に基づき、トモセラピー～Radixactの歴史の中でも画期的な新機能である動体追尾システムSynchronyを搭載したRadixactを2020年7月に

国内に先駆けて導入した。Synchronyの特長や、これまでの臨床経験などにつき概説する。

肺定位放射線治療は、早期肺癌・転移性肺腫瘍に対して優れた治療成績を挙げており、トモセラピー～Radixactを用いた肺定位放射線治療に関しても、優れた治療成績を挙げているという報告は複数みられる。Radixactを用いた肺定位放射線治療の長所として、PTV (Planning Target Volume) に対してconformalかつ比較的均一な線量分布を実現できること、IMRT技術を併用することで近接しているOAR (Organs at risk) の線量低減が容易であること、MV-CTを用いることで正確な位置精度が得られること・治療期間中の腫瘍の性状変化を把握しやすいこと、などが挙げられる。反面、短所として、coplanar照射を用いることで、肺の低線量領域が相対的に広がること、IMRT技術を併用していることによる呼吸性移動に伴う線量分布の不確かさ、などが挙げられる。

従来のSynchrony導入以前の実臨床におけるトモセラピー～Radixactを用いた肺定位放射線治療



**図1 Synchronyのシステム構成**  
左：Radixact内部、右：Radixact外観

の治療成績と放射線肺臓炎などの有害事象は他装置とほぼ同等とされているが、一部に重篤な放射線肺臓炎の報告がみられており、より良い線量分布の実現のため、呼吸性移動対策システムの導入が待ち望まれていた。

動体追尾システム Synchrony は待望の Radixact における呼吸性移動対策システムであり、元々はサイバーナイフにて開発されたシステムで新たに Radixact にも適用され、昨年 (2020年) 夏よりわが国でも臨床使用が可能となり、Radixact においても動体追尾法による定位放射線治療が可能となった。当施設は東海地方では初めて、わが国で2施設目の導入施設である。

## Synchronyについて

図1にSynchronyのシステム構成について示す。Radixactのガントリ上のLinac-MVCT検出器と垂直の位置に配置されたkV線源-kV検出器により、kV画像を随時撮影可能となっている。また、Synchronyカメラにより、体表面に貼付したLEDマーカの位置情報を随時取得可能となっている。肺定位放射線治療においては、体内への金属マー

カの留置を施行しなくてもターゲットの判別・追尾・検出が可能であり、つまりマーカレスでの非侵襲的な追尾照射が可能である。

Synchronyは、常に追跡・照射すべき標的を判別・追尾し、標的の位置の変化を経時的に検出し、検出された標的の位置に正確に照射されるようリアルタイムに照射位置に補正を加えながら照射を施行するシステムである。具体的な追尾照射の手順は以下の通りである(図2も参照されたい)。

- ① kV線源とkV検出器を用いて、ガントリ1回転の間に2~6回にわたり数秒間隔にてkV画像を撮影する。同時に、体表面に貼付したLEDマーカの呼吸による移動をSynchronyカメラで追跡して呼吸波形を取得する。
- ② ①で撮影した直近の20枚のkV画像と、Synchronyカメラから取得した呼吸波形から算出した呼吸位相と標的の位置の相関モデルを用いて、標的の位置を随時予測していく。
- ③ 呼吸位相と標的の位置の相関モデルにより予測した標的の位置に合わせて、Dynamic JawとBinary MLCの駆動をリアルタイムに補正して照射を行う。Dynamic Jawが頭尾方向の、Binary MLCが前後方向・左右方向の移動に対応する。

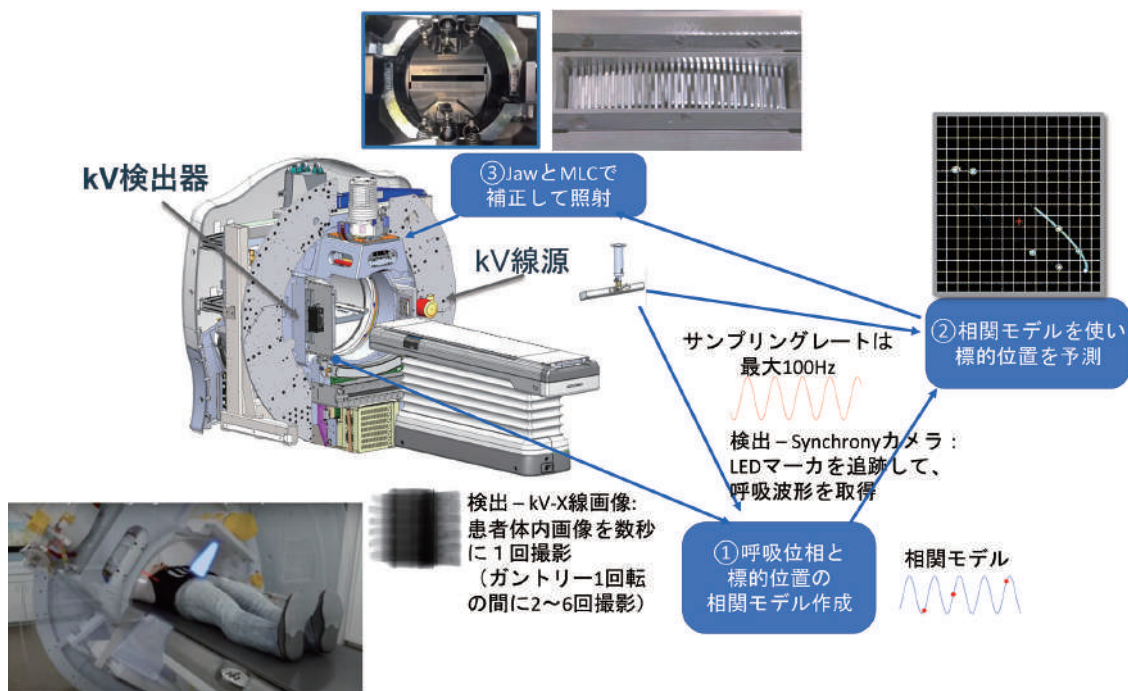


図2 Synchronyの動体追尾照射手順

④ 照射中もkV画像撮影と体表面LEDマーカ追跡を継続し、呼吸位相と標的位置の相関モデルを随時更新し、リアルタイムに補正を継続して照射を施行していく。

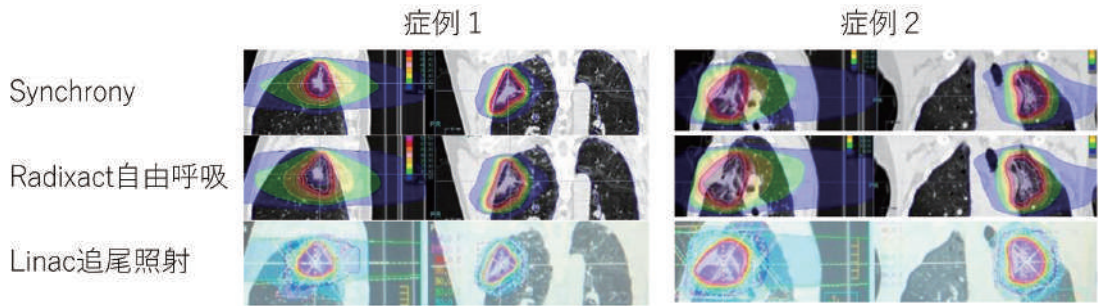
以下にSynchronyの利点・長所を列挙する。Synchronyを適用することにより、呼吸性移動に伴う線量分布の不確かさを解決し、PTVの容積を相対的に小さくすることで肺の低線量領域を縮小することができ、従来のRadixactによる肺定位放射線治療の短所を解決することが可能である。また、追尾照射法を用いることにより、呼吸制限法（腹部圧迫法）のように患者に物理的な負担をかけず、呼吸停止法のように呼吸停止を必要とせず、呼吸同期法に比べて比較的短時間で治療可能であり、患者および医療者の負担を軽減することが可能である。さらに、肺内病変においてはマーカレスでの非侵襲的な治療が可能であり、体内金属マーカ留置時の気胸・マーカのmigrationなどの問題がなく、患者の苦痛および医療者の負担が少ない。加えて、照射時間中もリアルタイムに呼吸位相と

標的位置の相関モデルをアップデートして補正しながら照射しており、位置のずれや呼吸状況の変化に強いとされている。そのうえ、Planningに呼吸時CTを使用するため、相対的にPlanningが簡便であるという利点がある。

### Synchronyの臨床経験

これまでにSynchronyを使用して治療を行い3ヵ月以上経過した症例は、6例の肺定位放射線治療、2例の肺のブースト照射症例である。なお、肝臓や前立腺などに対する体内金属マーカを用いたSynchronyの臨床応用は当施設ではまだ施行しておらず現時点では言及できないが、今後施行していく方向である。

肺定位放射線治療症例6例の内訳は、年齢68~88歳（中央値81歳）、男性4名・女性2名、ECOG PSは0が1名・1が4名・3が1名、T stageはT1cが3名・T2aが1名・T2bが2名、病変部位は右肺上葉が4名・左肺上葉が2名、総線量/回数



**図3** 症例1と2の線量分布比較例  
 上段：Synchrony臨床使用プラン  
 中段：Radixact自由呼吸法の仮想プラン  
 下段：Linacを用いたnon-coplanarの追尾照射法の仮想プラン

はD95処方にて60Gy/8回が4名・50Gy/4回が2名であった。肺定位放射線治療症例のうち、1例では呼吸波形が安定せず治療時間を要したが、CPAP(持続的陽圧呼吸)を用いて解決した。その他の症例は比較的短時間で治療を完了した。現在までのところ、いずれの症例も治療後の経過は良好で、局所制御が得られ再発・転移を認めておらず、CT-CAE v5.0にてGrade 2以上の有害事象は観察されていない。その他、非常に淡いすりガラス状陰影の症例・骨に病変が強く接する症例それぞれ1例において追尾が不可能であり、Synchronyの適用を断念して従来の肺定位放射線治療を施行している。

### Synchronyと従来法・non-coplanar 定位照射の比較

従来のSynchrony導入以前のトモセラピー～Radixactを用いた肺定位放射線治療については、線量分布についてはcoplanar照射の中では比較的良好とされているが、non-coplanar照射にはわずかに及ばないとされていた。

Synchronyを使用して肺定位放射線治療を施行した当初の5症例において、従来のSynchrony非使用のRadixactにおける自由呼吸法を想定した仮想プラン、またLinacを用いたnon-coplanarの肺定位放射線治療の追尾照射法・自由呼吸法を想定した仮想プランをそれぞれ作成し、臨床使用したSynchrony追尾照射プランと線量分布を比較した(図3)。

表にその結果を示す。Synchronyを使用することにより、Radixact自由呼吸法やnon-coplanarのLinac自由呼吸法に比べ、PTV volume・MLD(Mean Lung Dose)・Lung V20およびV5を大きく低減できている。さらに、これらの線量分布はnon-coplanarのLinac追尾照射法と比較しても遜色なく、肺低線量域についてはLinac追尾照射法よりも低減できる傾向がみられた。加えて、IMRT技術を利用できることにより、Linac追尾照射法・自由呼吸法に比して、心臓・気管気管支・食道などのOARの線量をより低減できる傾向がみられた。肺定位放射線治療において、放射線肺臓炎のリスク因子とされるPTV volume・Lung V5-30・MLDは特に重要とされており、Synchronyを使用することによってこれらのパラメータを大きく低減することができ、放射線肺臓炎のリスクを低減させることが期待できる結果であった。

### おわりに

Synchronyを使用した肺定位放射線治療は優れた線量分布を実現し、現在最良とされる呼吸性移動対策併用のnon-coplanar肺定位放射線治療に比肩していた。Synchronyを使用することで、肺定位放射線治療の優れた治療成績はそのままに、放射線肺臓炎などの有害事象を軽減させることが期待される。症例数に限りはあるが、当施設での治療症例においては明確な有害事象はみられておらず、私個人の印象としては、従来よりかなり安心して

表 Synchronyと各仮想プランの線量分布比較結果

	Synchrony	Radixact自由呼吸	Linac追尾照射	Linac自由呼吸
PTV volume (cc)	48.2	70.4	48.2	70.4
MLD (Gy)	4.1	4.7	4.2	4.7
肺 V20 (%)	6.1	7.1	<b>5.5</b>	6.6
肺 V5 (%)	<b>17.5</b>	20.3	20.1	23.0
気管/PBT max (Gy)	20.8	22.7	22.0	29.9
気管/PBT 4 cc (Gy)	9.7	11.3	10.2	12.3
大血管 10 cc (Gy)	27.4	32.5	26.8	31.7
肋骨 max (Gy)	70.2	73.2	71.1	72.6
肋骨 1 cc (Gy)	65.8	69.8	68.5	71.1
食道 max (Gy)	16.2	20.9	19.6	23.8
食道 5 cc (Gy)	9.1	10.6	10.8	12.6
心臓 max (Gy)	<b>2.4</b>	3.7	15.4	15.9
心臓 15cc (Gy)	<b>0.8</b>	1.7	9.4	10.2

5症例の平均値。太字は5症例すべてで最良の値を示した項目。  
(MLD; mean lung dose、PBT; proximal bronchial tree)

Radixactによる肺定位放射線治療を行うことができるシステムと考えている。Synchronyは、マーカレスで非侵襲的かつ患者負担が少なく信頼性の高い追尾照射を短時間で簡便に施行可能である優れたシステムと考えられる。

#### 謝辞

本稿の作成にあたり、情報・資料提供をいただいた(株)アキュレイ・(株)日立製作所の方々には、この場をお借りして感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 築瀬牧子ほか：高精度放射線治療のさらなる進化を目指して。映像情報メディカル 52(11): 45-49, 2020

# 新機能 VOLO Ultra™ と ClearRT™ を 用いた放射線治療の高速化、 高画質化の取り組み

隅田伊織

アキュレイ株式会社 Physics and clinical support

Key  
Words

●ヘリカルkVCT ●位置照合 ●Adaptive radiotherapy

高精度放射線治療の実施は強度変調放射線治療と画像誘導放射線治療の両輪が必須である。治療計画立案で高速の線量最適化および照射時間の短縮を実現すべく線量最適化エンジンである VOLO Ultra™ を利用し、放射線治療機に搭載する診断用 X 線管球と kV Detector を利用したヘリカルkVCT撮影を可能とした ClearRT™ を利用する。両システムを用いて短時間の位置照合を実現し、腫瘍および正常組織への線量制約を満足する照射線量を患者へ提供する。

## はじめに

高精度放射線治療として強度変調放射線治療 (Intensity-modulated radiation therapy : IMRT) および定位放射線治療 (Stereotactic radiotherapy : SRT) が挙げられる。いずれの照射技術も腫瘍に対して線量集中性を高め、正常組織への線量を可及的に軽減する技術である。また、SRTでは腫瘍に対する1回当たりの処方線量を増加させ、総照射期間を短縮している。これら照射技術は腫瘍と正常組織間の線量勾配を急峻に設定するため、数ミリという臓器間の距離の変化が、数十パーセントの線量変化に繋がる。そのため、正確に処方線量を腫瘍に対して照射するためには画像誘導 (Image guidance) 技術を併用する必要がある。照射直前に照射部位の画像取得を行い、治療計画通りの照射位置で照射可能とすべく照射部位の位置照合を行う。これを画像誘導放射線治療 (Image-guided radiation therapy : IGRT) と呼ぶ。

患者に対して医師の処方線量を正確に照射するためには、前述の IMRT と IGRT あるいは SRT と IGRT を組み合わせる必要がある。1回の放射線治療にかかる時間短縮も重要な要素である。なぜなら照射時間の延長に伴い、照射中の患者の体動や体内臓器の動きや変形が起こる確率が増加し<sup>1)</sup>、患者への負担軽減にも繋がるからである。これらに対する改善が求められていた。また、今後の放射線治療の方向性として適用放射線治療 (Adaptive radiotherapy : ART) が着目され、治療計画時の体型変化や体内臓器の形状変化に対応すべく、照射期間中あるいは照射直前に再度治療計画を立案し、治療計画を変更する発想に注視されている。

上記を実現するためには、高速の撮像技術、治療計画立案、そして位置照合技術が要求される。今回、Tomotherapy® の最新プラットフォームである Radixact® に新しくオプション搭載した機能、ヘリカルkVCTイメージングシステム ClearRT™、治療計画装置 Precision に新たに搭載された線量最適化エンジン VOLO Ultra™ を紹介する。

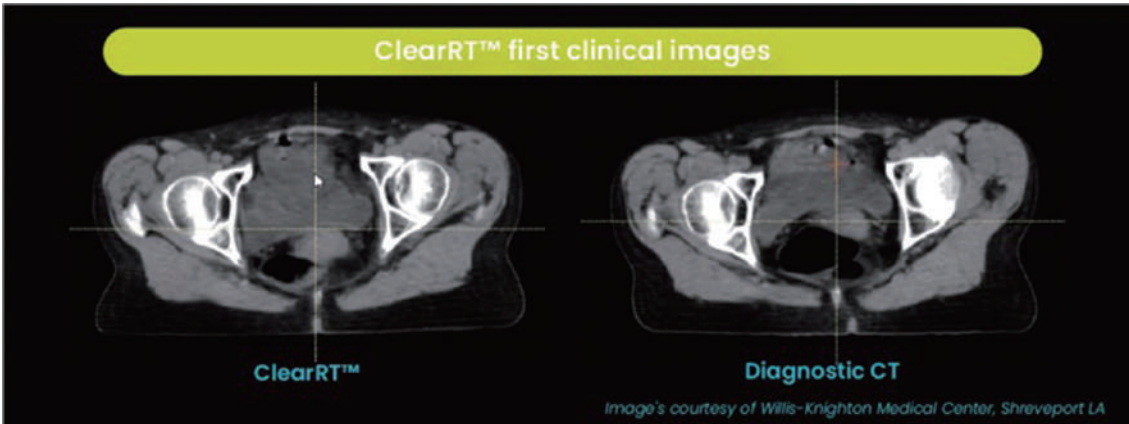


図1 骨盤部のCT画像(左: ClearRT™で撮像、右: 診断用X線CT装置で撮像)

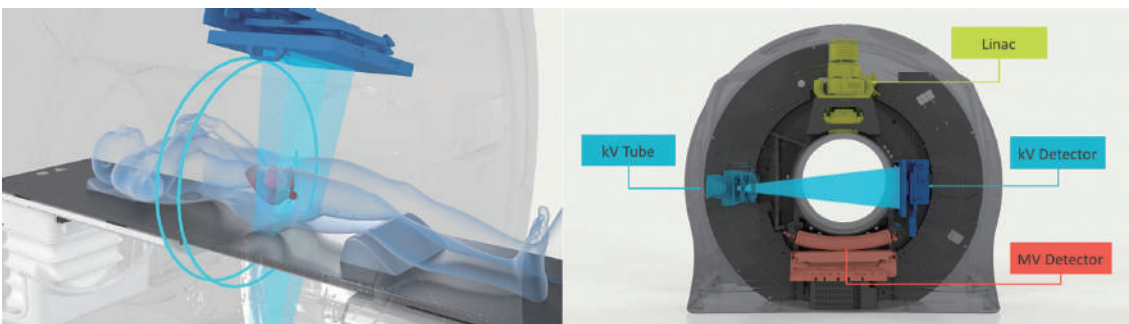


図2 ヘリカル撮影概念図(左)およびガントリ内部構造(右)

### ClearRT™を用いた撮像技術

ClearRT™はkV X線を利用したヘリカルCT撮影が可能な技術で、高鮮明なIGRT画像を提供する。2020年12月に本技術は米FDAの510(k)を取得し、2021年3月に日本の厚生労働省から製造販売承認を取得した。これは正確かつ短時間の位置照合を可能とするソリューションである。図1に骨盤部のCT画像(ClearRT™を用いたCT画像(左)、参照として診断用X線CT画像(右))を示す。

図2右にRadixact®のガントリ内部構造を示す。放射線治療用ビームはフラットニングフィルタフリーの6MV X線を用いLinac (Linear Accelerator: 直線加速器)から射出される。Linacに対向してMV Detectorが配置されており、X線ビームの検出を行っている。ビーム出力やビームプロファイル形状の精度確認および患者を透過したX線強度の確認に利用している。ClearRT™は放射線治

療用ビームと直交する位置に診断用kV X線管球と、それに対向する位置にkV Detectorが配置され、この両者を用いてヘリカルkVCT撮影を可能としている。Radixact®独自のハードウェア技術であるガントリの連続回転と、カウチの連続動作機構にファンビームを搭載したヘリカルイメージング機能である。ガントリ回転速度は約8秒/周で、最速撮影モードでは1分で1mのボリューム撮影ができ、頭尾方向で最長135cmの撮影ができる。撮像視野は最大で直径50cmである。

### 放射線治療に求められる画像

前述の通り放射線治療では治療計画通りに照射するため、毎回の放射線治療時に位置照合を必要とする。位置照合を正確かつ迅速に実施するためには次の要件が求められる(表1)。

位置照合イメージングは従来コーンビームCTが

表1 位置照合の画像要件

項目	必要条件
均一性	画像ノイズが少なく、均質な密度領域内のCT値のばらつきが小さい。均質な密度領域視野内における中心部と辺縁部のCT値の差が少ない。
空間分解能・コントラスト	高精細（より細かいものが見える）。 コントラスト識別能が高い（脳の白質灰白質の区別、腫瘍の区別等）。
画像の大きさ・歪み	3次元画像再構成された画像内での空間的距離が正しい。 再構成画像に歪みがない。
画像の位置精度	放射線治療用ビームと位置照合用ビームの中心が許容以内（1 mm）で一致している。

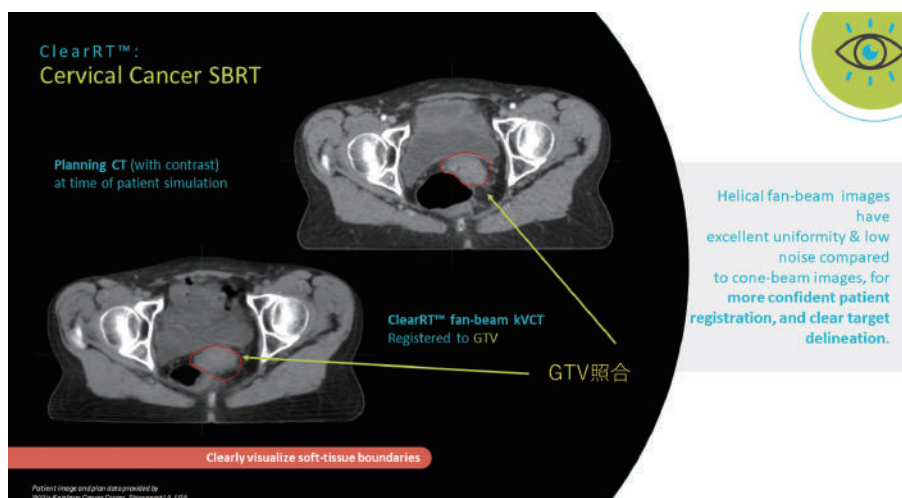


図3 子宮癌に対する放射線治療におけるGTVを用いた位置照合

広く使用されてきたが、3次元再構成画像の画素値の不均一性、Motion artifactの発生に伴う画質の劣化が指摘されてきた<sup>2, 3)</sup>。ClearRT™ではコーンビームを使用せずファンビームを使用し、加えてファンビームにおける頭尾方向のビーム幅を絞ることによって、散乱線によって発生する画像ノイズを軽減し、高画質を実現した。頭尾方向のビーム幅を変化させ、広いビーム幅では高速撮影ができ、狭いビーム幅では高画質撮影ができる。治療部位に適した撮像パターンを選択できることがメリットである。

図3に子宮癌に対する放射線治療におけるGTV (Gross tumor volume: 肉眼的腫瘍体積)を用いた位置照合例を示す。上段は治療計画用造影CT画像で赤線の囲われた領域がGTVである。下段はClearRT™で撮影されたCT画像である。コントラスト識別能が高いことから、腫瘍の位置を正

確に認識し、位置照合が可能となっている。

### 線量最適化エンジンVOLO Ultra™

IMRTを担うパートは2つある。1つはハードウェア担当としてマルチリーフコリメータの開閉時間を制御する機構であり、もう1つはソフトウェア担当として治療計画装置である。治療計画者はCT画像上に腫瘍と正常組織の輪郭描画を行い、各々に対して線量制約を設定する。腫瘍へは処方線量、正常組織へは線量に応じた放射線障害発生確率を考慮した設定を行う。治療計画立案手法はビームの照射方向とビーム強度を治療計画者が設定するフォワードプランニングと異なり、臓器の位置および線量制約を設定し、繰り返し演算による最適化アルゴリズムによって適切なビーム強度を計算機に実行させるインバースプランニングが、



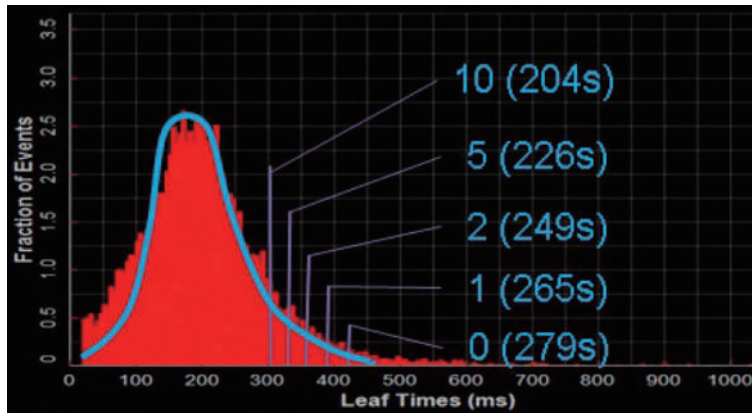


図4 マルチリーフコリメータの開口時間と頻度

IMRTでは使用される。2021年8月にリリースしたVOLO Ultra™は治療計画装置Precisionに搭載された高速の線量最適化エンジンである。

### 最適化演算の高速化

一般に最適化演算は繰り返し実施される。放射線治療の場合、あらかじめ設定した制約線量値と繰り返し演算過程での線量値の差が最小となるように演算が進む。VOLO Ultra™では、毎回の繰り返し演算で使用する線量計算アルゴリズムはFluence Convolved Broad Beam (FCBB) アルゴリズムを用い、20回に1度のタイミングでCollapsed Cone Convolution Superposition (CCCS) アルゴリズムを用いている。前者と後者のアルゴリズムの違いは、不均質密度領域での線量計算精度である。線量計算時間はFCBBアルゴリズムの方が短く、線量計算精度はCCCSアルゴリズムの方が高い。繰り返し演算過程の計算時間短縮を目的とし、20回に1度のタイミングで高精度線量計算アルゴリズムを組み入れることにより高い計算精度を維持している。

最適化アルゴリズムはLimited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno Bound (L-BFGS-B) 法と呼ばれる準ニュートン法を利用している。ニュートン法は単純な山登り法であるため山の勾配がゼロになる場所を探索するアルゴリズムである。そのため、計算が単純で高速に収束させることができる。しかし、勾配がゼロの場

所が必ずしも最適解とは限らず、局所解に陥ることが懸念される。そこで、準ニュートン法では山の勾配を算出する際に数学的に勾配を計算せず、必ず正の勾配を持つように勾配を近似させ、繰り返し演算を行っている。その結果、局所解に陥ることなく収束へと導くことが可能となっている。また、線量最適化アルゴリズムに必要なパラメータは、臓器に対する線量制約(腫瘍であれば最小線量と最大線量、正常組織であれば最大線量)であり、本アルゴリズムはパラメータ範囲に制約がある場合を得意としている。

最適化計算が進むことによって、マルチリーフコリメータの開閉時間の調整がなされる。これによって、繰り返し演算下で臓器線量に変化する。図4は横軸にマルチリーフコリメータの開口時間、縦軸にその開口時間となる頻度をヒストグラム化したグラフである。腫瘍ならびに正常組織形状および腫瘍と正常組織の3次元空間内の位置関係によって強度変調割合は左右する。マルチリーフコリメータの開口時間に大きなバラツキがある場合は、強度変調の変化量が大きいことを意味し、その変調を作り出すためにより複雑なマルチリーフコリメータの開口パターンとなる。これは治療時間延長に繋がる。

Boydらは開口時間のバラツキを抑制するため(極端に長いあるいは短い開口時間を持つマルチリーフコリメータを除外するため)に、開口時間の頻度分布をガウス関数で近似させ(図4の青線)、近似カーブから逸脱する開口時間を持つマルチリーフ

**表2** 線量最適化時間に関する新旧比較<sup>5)</sup>

治療部位	処方線量	VOLO Classic™	VOLO Ultra™
前立腺	78 Gy	613秒	305秒
両側頸部	70 Gy	225秒	123秒
肺	45 Gy	738秒	135秒
乳房	60 Gy	720秒	145秒
椎体骨転移	24 Gy	640秒	60秒
平均時間		587秒	154秒

コリメータを除外することを考案し、治療時間を短縮しつつ、良好な線量分布を維持する手法を考案した<sup>4)</sup>。治療計画装置上では除外する程度は、ユーザが任意に設定可能としている。0段階から10段階まで設定でき、値を大きく設定することによって除外されるマルチリーフコリメータが増加し、照射時間の短縮に貢献する。しかしながら、本来除外する予定ではないマルチリーフコリメータが除外されることによって、線量分布形状に歪みが発生する。治療計画者は照射時間の短縮と時間短縮を考慮した場合の線量分布のバランスを判断する必要がある。

表2に、前立腺、両側頸部、肺、乳房、椎体骨転移を例に旧線量最適化エンジンVOLO Classic™および新線量最適化エンジンVOLO Ultra™を用いた場合の線量最適化時間を示す。線量最適化の平均時間として約70%短縮した。

## おわりに

放射線治療ワークフローの中で治療計画および位置照合について、時間的高速化と精度向上の両方

を満足するためのシステムとして、VOLO Ultra™線量最適化エンジンおよびClearRT™によるヘリカルkVCT撮影システムについて述べた。両システムを組み合わせ、スループットの高い放射線治療を患者に提供できるものとする。また、ARTをリアルタイムで実施する上でも、治療計画時間および位置照合時間の高速化は必須であるため、両システムは大いに貢献するものと確信している。

## 参考文献

- 1) Ghilezan MJ et al: Prostate gland motion assessed with cine-magnetic resonance imaging (cine-mri). Int J Radiat Oncol Biol Phys 62 (2): 406-17, 2005
- 2) Yang Y et al: Evaluation of on-board kV cone beam CT (CBCT) -based dose calculation. Phys Med Biol 52 (3): 685-705, 2007
- 3) Fotina I et al: Feasibility of CBCT-based dose calculation: comparative analysis of HU adjustment techniques. Radiother Oncol 104 (2): 249-56, 2012
- 4) Boyd R et al: Determining efficient helical IMRT modulation factor from the MLC leaf-open time distribution on precision treatment planning system. J Appl Clin Med Phys 20 (5): 64-74, 2019
- 5) 社内資料 (Feasibility report of dose optimization comparison for VOLO Ultra™)