

# 特集

## 乳癌SGRTの最前線

### 乳癌の術後放射線療法におけるSGRTの運用法

乳癌の術後照射は、放射線治療の初心者が最初に教わる照射法であったり、その施設で最も症例数が多い疾患であったりすることが多いと思います。基本的な照射法でありながら、容易に変形する乳房という臓器に対して正確に位置合わせを行うことは簡単ではありません。映画の1シーンにあったようなレーザー光線が何かでスキャンして自動で位置合わせしてくれないかなと空想した方もいらっしゃると思いますが、今それに近い製品が実用化されています。また、位置合わせのための皮膚マーカを頸部まで何本も描かれる場合、それを他人に見られるのが恥ずかしいため、スカーフを巻いたり、外出を控える患者さんもいます。

光学式ステレオカメラなどを用いて皮膚表面をスキャンして位置合わせを行うSurface-guided radiotherapy (SGRT)であれば、皮膚マーカなしでの位置合わせも原理的に可能で、さらに、照射ビームオン中の位置ずれのモニタリングも可能です。深吸気息止め法 (Deep inspiration breath hold: DIBH) の際のビームオン/オフやコーティングディスプレイとの連動も考えられます。

一方、従来のX線撮像システム、ひいては骨合わせとの整合性はどうか、乳房の浮腫や術後の変形などで大きさや形が変わってしまっても認識できるのか、などの問題点も考えられます。多くのモダリティが混在してくると、いったい何と何をどういう順番で組み合わせるのが正解なのかという疑問も生じてきます。今回の特集では、乳癌SGRTの経験豊富なご施設から、使用機種別に実際の運用を解説していただきます。明日からの診療や機器購入のご参考になりましたら幸いです。

がん研究会有明病院 放射線治療部 吉岡靖生

### 当院におけるSGRTの展開と展望 ——患者にやさしく、精度は高く

京都大学医学部附属病院 放射線部 佐々木誠

#### 序文

近年、光学式患者ポジショニングシステムが普及し、多くの施設でSurface guided radiotherapy (SGRT) が実施されるようになりつつあり、現在までに頭部から四肢に至るまで、さまざまな部位でSGRTの有用性が報告されている<sup>1-3</sup>。その中でもターゲットが体表面に近く、体表面に十分な特徴量が含まれる乳腺領域はSGRTの特に良い適用である。従来の皮膚マーカによるセットアップよりも、SGRTにより位置精度が向上したという報告は多数あり<sup>4,5</sup>、これは皮膚マーカレスが可能であることを意味しているともいえるだろう。またSGRTはリアルタイムで患者位置をモニタリング

可能であり、深吸気息止め照射 (DIBH) での呼吸管理においても有用とされており<sup>6</sup>、患者の体動が生じた際には迅速に検出し位置修正が可能である。

当院では2020年に光学式患者ポジショニングシステムであるAlignRT (Vision RT) を導入し、臨床稼働をスタートした。AlignRTは患者の足側と両頭側の3台のカメラで構成されている。斑点パターンを含む赤色光を患者に投影し、投影パターンをカメラで読み取ることにより3次元体表面構造をリアルタイムで構築することが可能となる。構築した治療時の体表面と基準となる体表面 (通常は治療計画CTの体輪郭) の剛体レジストレーションにより体表面の位置ずれ量がリア

ルタイムで認識可能である。本稿では、AlignRTのコミッショニングから現状の臨床使用に関して、当院の経験を交えて紹介する。

## 品質管理

AlignRTにおいても他の放射線治療関連機器と同様に臨床稼働前のコミッショニングは必須である。当院ではコミッショニング項目のひとつとして、胸部ファントムを使用したEnd to End試験を実施し、CBCTと比較して1.0 mm、0.5°以内のセットアップ精度を有していることを確認した。当時は参考となるガイドラインがなく手探りでコミッショニングを行ったが、現在はAAPMやESTROからSGRTに関するガイドラインが発刊されており、それらを参考にしたコミッショニングを推奨する。

臨床稼働後のAlignRTのDaily QAとして、専用プレートを使用したカメラ3台のアラインメントの定常性チェックが必要である。約1分で完了する簡便な検証であるため始業点検においても大きな手間にはならない。またAlignRTシステムの座標中心を画像系の中心(MV or kV)に合わせこむことでより高精度な患者セットアップが可能となる。

## 臨床使用

一般的に放射線治療では治療室に設置されたレーザと患者の皮膚に直接描いたマーキングによってセットアップを実施し、患者の位置精度を担保してきた。しかしながら、皮膚マークは患者の精神的なストレスとなることが報告されており<sup>7,8</sup>、また、マーキングが患者セットアップ時のスループット低下を招く要因でもあった。これに対して、近年、AlignRTを使用したマーカレスセットアップは皮膚マーク/レーザセットアップよりも患者位置精度が向上する<sup>9</sup>とした報告が多

くみられるようになってきた。当院においても、全乳房照射の患者を対象として、従来の皮膚マーク/レーザセットアップと比較してAlignRTによる6軸オートセットアップの患者位置精度が同等以上であることを確認した<sup>9</sup>。その結果、2022年からは皮膚マークを削減し、AlignRTによる6軸オートセットアップを行っている。具体的には図1に示すように、従来の皮膚マーキングと比較して、アイソセンタマークを削減し、照射野は中央部と上下端のみをマーキングする運用としている。当院において、全乳房照射を完全マーカレスに移行していない理由は、Asadaらの皮膚マーキングに関するアンケート調査の結果、マーキングにより患者自身が照射部位を視認できることによって、意識的に皮膚刺激を避けることができるという好意的な回答があったこと<sup>8</sup>、また患者セットアップの際に、正中を超えて対側乳房に照射されていないことを目視確認できるというメリットも有しているためである。

また、左全乳房に対するDIBHではAlignRTを呼吸性移動管理ツールとして使用することにより、息止めの再現性と安定性の評価が放射線による被ばくなしで行える。さらにTrueBeam (Varian) との組み合わせでは、AlignRTであらかじめ設定したしきい値を逸脱した場合、自動的にビームホールドとなる機能を有している。当院では、DIBHによる左全乳房照射ではAlignRTのしきい値を各並進方向に3 mm、各回転方向に2°として臨床運用を行っている。また照射中はEPIDにより治療ビームのシネ画像を取得することによって、AlignRTによる息止めの再現性と安定性を担保している。

## AlignRT使用の注意点

VMAT症例では、ガントリ回転によりガントリヘッドやkVイメージャーが、AlignRTの1台または2台の

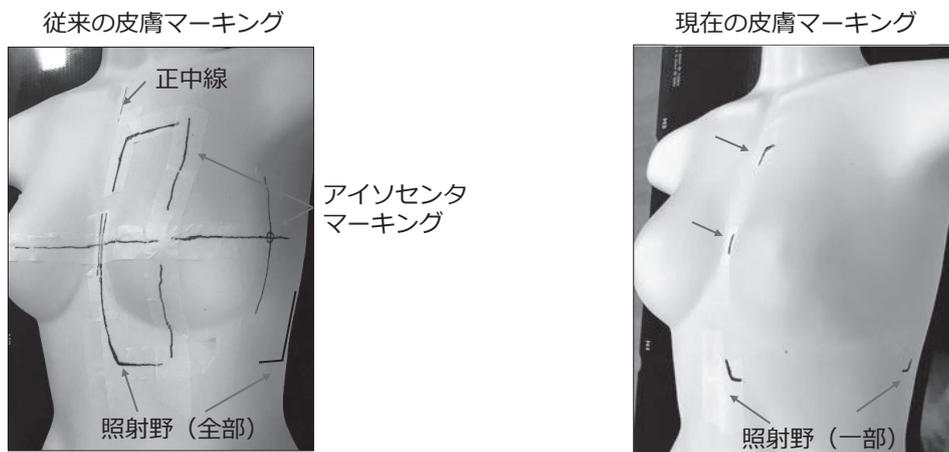


図1 従来の皮膚マーキングと現在の皮膚マーキングの比較

カメラを遮蔽することによって、照射中にAlignRTの表示値が突然変化することがある。臨床現場ではカメラ遮蔽の影響か患者の体動か判断ができないこともしばしばあるため、注意が必要である。この場合、当院では一度カメラ遮蔽の生じないガントリ角度に戻してAlignRTの表示値を確認する、またはDIBH症例では他の呼吸性移動管理システム（当院ではRPM (Varian)）と併用することによって、患者の体動を確実に検出できるように努めている。

また、AlignRTは位置照合アルゴリズムの特性上、術後の浮腫や液貯留によって生じる体表面の非剛体な変化が存在する場合に照合精度が低下することが知られている<sup>10</sup>。したがって、術後の浮腫や液貯留が顕著な症例では、定期的に画像照合を行いAlignRTによる位置照合の精度を担保しておくべきである。この点において当院では、VMATを使用した乳癌術後の領域リンパ節を含む照射例では、少なくとも週1回はCBCTを撮影し、AlignRTの照合精度を確認している。

### 乳房以外の部位への展開

当院では、頭部定位照射において、AlignRTとオープンフェイスマスクを併用し照射中の患者体動を監視している。これによって、kV-X線撮影による体動確認の頻度を減らすことができ、さらに治療時間の短縮も可能になった。また、体幹部や四肢のセットアップにもAlignRTを使用している。AlignRTによるセットアップ精度を十分に把握したうえで、2025年より骨盤部と四肢の照射は完全マーカレスでのセットアップに移行した。今後、骨盤部や四肢で問題が生じないことを確認できれば、胸部や腹部においても完全マーカレスへの移行を検討している。一方で、SGRTによるセットアップでは、体輪郭形状の変動による突発的なセットアップ精度の低下が生じることがあるため、IGRTを併用し、十分に注意して画像照合を実施することを推奨する。

### 最後に

SGRTは乳がんの術後放射線治療において、皮膚マークの削減により患者のQOL向上に貢献し、また、患者セットアップにおけるスループット改善をもたらした。さらに被ばくすることなしで治療中の体動のモニタリングが可能になった。これらの経験から、当院では2025年から乳房以外の部位（骨盤部や四肢）でも

マーカレス（マーカ削減）セットアップを取り入れており、今後さらなる適応拡大を検討中である。一方で、診療報酬に関しては乳房照射に係るものに限定されており、今後は他部位への適応拡大が期待される。

### 参考文献

1. Svestad JG, Heydari M, Mikalsen SG, et al. Surface-guided positioning eliminates the need for skin markers in radiotherapy of right sided breast cancer: a single center randomized crossover trial. *Radiother Oncol*. 2022;177:46–52.
2. Wiant D, Liu H, Hayes T.L, et al. Direct comparison between surface imaging and orthogonal radiographic imaging for SRS localization in phantom. *J Appl Clin Med Phys*. 2019;20(1):137–144.
3. K Yamashita, Shimizu T, K Miyabayashi, et al. Utility of a skin marker-less setup procedure using surface-guided imaging: a comparison with the traditional laser-based setup in extremity irradiation. *Radiol Phys Technol*. 2024;17(2): 569–577.
4. Hattel SH, Andersen PA, Wahlstedt IH, et al. Evaluation of setup and intrafraction motion for surface guided whole-breast cancer radiotherapy. *J Appl Clin Med Phys*. 2019;20:39–44.
5. Kügele M, Mannerberg A, Norring Bekke S, et al. Surface guided radiotherapy (SGRT) improves breast cancer patient setup accuracy. *J Appl Clin Med Phys*. 2019;20:61–8.
6. Reitz D, Walter F, Schonecker S, et al. Stability and reproducibility of 6013 deep inspiration breath-holds in left-sided breast cancer. *Radiat Oncol*. 2020;15:121.
7. Moser T, Creed M, Walker R, Meier G. Radiotherapy tattoos: Women's skin as a carrier of personal memory-What do we cause by tattooing our patients? *Breast J*. 2020;26:316–8.
8. Asada H, Takahashi Y, Ono Y, et al. Emotional experiences of skin markings among patients undergoing radiotherapy and related factors: a questionnaire-based cross-sectional study. *Patient Prefer Adherence*. 2022;16:1359–69.
9. M Sasaki, N Matsushita, T Fujimoto, et al. New patient setup procedure using surface-guided imaging to reduce body touch and skin marks in whole-breast irradiation during the COVID-19 pandemic. *Radiol Phys Technol*. 2023;16:422–429.
10. 田上穂, 松下矩正, 佐々木誠, 他. 体表面画像誘導を用いた左乳房全切除術後の深吸気呼吸停止下照射におけるセットアップ精度. *日放技学誌* 2025;81(5): 25–1538.

## AlignRT —— 聖路加国際病院における乳がん放射線治療へのSGRTシステムの利用

聖路加国際病院 放射線腫瘍科 山内遼平  
 聖路加国際病院 放射線腫瘍科 富田史紘  
 聖路加国際病院 放射線腫瘍科 秋山 忍  
 聖路加国際病院 放射線腫瘍科 石倉 聡

### AlignRTについて

AlignRTは、VisionRT社が開発したSGRTシステムであり、国内では約50台、世界ではおよそ3000台の導入実績がある。

治療室内に設置された3台の高精度カメラによって構成され、患者の体表面をリアルタイムで三次元的に追跡し、微小な位置変動を検出することが可能なシステムである(図1)。

また、リニアックと連携することで、検出された位置ずれ情報を治療カウチに伝達して自動補正する機能や、設定されたトレランスを超えた動きを検出した場合にビームを自動停止する「自動ビームホールド」機能を有している。さらに、基準体表面の外輪郭をライブ映像上に重ねて表示するオプション機能があり、視覚的な位置合わせを支援することも可能である。

### 乳房照射へのSGRTの利用

SGRTは、頭部SRS、乳房、DIBH下乳房照射、腹部、骨盤、四肢など、全身のさまざまな部位の治療に応用されているが、とくに乳房は広く利用されている領域のひとつである。これは、乳房体表面が治療標的を代替する役割を果たし、体表面照合と画像照合の結果が良好であるためである。このため、AAPM TG-302では、SGRT導入時には乳房症例から使用経験を積むことが推奨されている<sup>1)</sup>。

当院でも、全乳房照射患者からSGRTを臨床導入し

た。AlignRTを用いたセットアップでは、単なる機械的精度にとどまらず、関心領域(ROI)の設定や運用方法が精度に大きく影響する。AlignRTでは、ROI内の体表面情報をもとに並進および回転の位置ずれを算出するため、凹凸のある部位を含み、かつ非剛体的変動の大きい腕や脇を除外するROI設定が重要である。Sauerらは、関心領域の最適化により、乳房照射におけるセットアップ精度が向上することを報告している<sup>2)</sup>。

当院では、初期セットアップではAlignRTが検出した位置ずれを参考に、可能な限り手動による位置合わせ(目標:5 mm/1.0°以内)を実施した上で、自動補正機能(カウチ誘導による6軸補正)を適用している。これは、AlignRTのカウチ誘導に過度に依存した場合、計画CT時の体位と著しく異なる変位や回転、さらにはねじれが生じるリスクがあるためである。この問題は、AlignRTがROI内の体表面情報のみに基づいてレジストレーションを行うという特性に起因する。すなわち、ROI外の体表面形状は評価に含まれないため、たとえAlignRT上の指標が良好であっても、実際の画像照合結果は不良となり、整合性が取れない原因となる。

### 乳房SGRTの最前線

#### 乳房照射におけるSGRTを用いた皮膚マーカースセットアップ

乳房照射においては、SGRTと皮膚マーキングを用いたセットアップ精度の比較が国内外で行われ、多く



図1 AlignRTの外観とアプリケーション画面

表1 乳房照射におけるSGRTシステムを用いたセットアップ精度の比較

	患者数	セットアップ方法	平均残余誤差 (mm)			
			Vert	Long	Lat	3D vector
聖路加国際病院 (2023年5月-6月、導入当初)	12	皮膚マーク	2.2	-0.6	-0.9	7.0
		皮膚マーク + SGRT	-0.2	-0.1	0.2	2.1
聖路加国際病院 (2024年4月-12月、現運用)	86	皮膚マーク	-	-	-	-
		SGRT	-0.5	-0.6	0.0	1.8
Kugüle et al, 2019	63	タトゥー	0.6	0.8	-0.6	4.2
		タトゥー & SGRT	1.5	0.4	-0.5	2.4
Hattel et al, 2019	10	タトゥー	-	-	-	5.4
		タトゥー & SGRT	-	-	-	4.2
Cravo et al, 2018	20	タトゥー	-3.1	-2.2	2.2	-
		タトゥー & SGRT	-2.1	0.5	-0.2	-
Rigley et al, 2020	43	タトゥー	-	-	-	5.2
		SGRT	-	-	-	4.7

の研究においてSGRTによる精度の向上が示されている<sup>3,4,5,6</sup>。一部の報告では、セットアップ時間の有意な短縮も報告されている。

当院では、2023年に皮膚マーキングに依存した従来のワークフローを見直し、皮膚マーカーレス照射への移行を実施した。臨床導入にあたり、最初の12例で皮膚マーキングとAlignRTによるセットアップ精度を比較した結果、AlignRTの方が高精度であること(7.0 mm vs. 2.1 mm、3Dベクトル方向)が確認された。これに基づき、段階的にマーキングの依存度を減らし、AlignRT単独によるセットアップ精度とワークフロー実現性を検証した。約2か月間の検証期間において、皮膚マーキングなしでも導入当初と同等の精度が維持できたことから、マーカーレス照射へ完全移行した。

乳房照射におけるSGRTのセットアップ精度に関する先行研究および当院の結果(導入当初および現運用)の比較を表1に示す。現在のセットアップ精度(平均±1SD、範囲)は、全乳房照射患者で1.8±1.7 mm(0.00-13.6 mm)であり、5 mm以内に収まった割合は96.7%であった。これらの結果は、国内外の先行研究と同様に、SGRTによる高精度なセットアップが可能であることを示している。

マーカーレス運用の導入により、患者の心理的負担軽減に加え、マーキング作業の省略による業務効率向上、皮膚マークの不確かさによる再セットアップの減少など、実務面でも多くの利点が認められた。また、従来、皮膚マーキングの説明・対応を担っていた看護師や診療放射線技師の業務負担も軽減された。

### 加速乳房部分照射とSGRT

SGRTを用いたセットアップ精度に関する報告は、

さまざまな部位に対して増加しているが、加速乳房部分照射(accelerated partial breast irradiation: APBI)患者に対する報告は限られている。

当院では、2024年よりAlignRTと外科手術用クリップを併用したAPBI専用ワークフローを導入した。この方法は、AlignRTによる体表面画像誘導セットアップの利点と、外科手術用クリップを用いた腫瘍位置の代替マーカーによる画像照合の利点を組み合わせることを目的として採用したものである。

APBI患者35例におけるセットアップエラー(平均±1SD)は、Vert方向0.1±1.8 mm、Long方向-0.9±2.2 mm、Lat方向-0.4±1.9 mmであり、全乳房照射時と同等の非常に良好な精度が得られた。また、入退出時間を除く治療時間(平均±1SD、範囲)は603.3±214.1秒(349-1353秒)であった。

AlignRTと外科手術用クリップの併用により、正確かつ迅速なセットアップおよび画像照合が可能となり、さらに従来必要であったCBCTによる画像照合を省略することも実現できた。これにより、被ばく低減とワークフロー効率化の両立が達成され、患者および医療スタッフ双方にとって有益な運用が可能となった。

### AlignRTの最前線

AlignRTでは近年、リアルタイム生体内線量測定(in vivo dosimetry)への応用が進められている。DoseRT®は、チェレンコフイメージングとAlignRTを組み合わせ、照射中の線量分布と患者位置を同時に可視化する技術である<sup>7</sup>。これにより、治療中に照射位置と線量の関係とその場で確認し、位置ずれが生じた場合には治療の一時停止や再調整といった対応が迅速に行える

ようになる。従来の熱ルミネセンス線量計 (TLD) や EPID、ログファイル解析とと比較して、治療中に対応が可能である点は大きな利点といえる。現在、乳房、頭頸部、肺などを対象とした臨床試験が進行しているが、国内ではまだ導入されておらず、今後の展開が注目される技術である。

また、MapRT®は、CTシミュレーション時にSGRTカメラで取得した体表面データを用い、治療計画段階で患者や固定具とリニアックとの干渉リスクを事前に予測する技術である<sup>8</sup>。乳がん放射線治療では、挙上した上腕が干渉するケースが多く、この技術を活用することで照射直前ではなく計画段階で干渉リスクを把握・回避できる点は大きな利点である。

### まとめ

AlignRTは乳房照射において、セットアップ精度と治療の安全性を高める重要なツールとなっている。適切に活用することで、皮膚マーカレス照射や画像照合回数の削減による被ばく低減、さらにはワークフローの効率化が実現可能である。今後もこうした経験をもとに、導入可能な技術を着実に取り入れ、より効率的で患者負担の少ない治療環境の構築を進めていきたい。

### 参考文献

1. Al-Hallaq HA, Cerviño L, Gutierrez AN, et al. AAPM task group report 302: Surface-guided radiotherapy. *Med Phys.* 2022;49(4):e82-e112. doi:10.1002/mp.15532
2. Sauer TO, Ott OJ, Lahmer G, Fietkau R, Bert C. Region of interest optimization for radiation therapy of breast cancer. *J Appl Clin Med Phys.* 2021;22(10):152-160. doi:10.1002/acm2.13410
3. Kügele M, Mannerberg A, Nørring Bekke S, et al. Surface guided radiotherapy (SGRT) improves breast cancer patient setup accuracy. *J Appl Clin Med Phys.* 2019;20(9):61-68. doi:10.1002/acm2.12700
4. Hattel SH, Andersen PA, Wahlstedt IH, Damkjaer S, Saini A, Thomsen JB. Evaluation of setup and intrafraction motion for surface guided whole-breast cancer radiotherapy. *J Appl Clin Med Phys.* 2019;20(6):39-44. doi:10.1002/acm2.12599
5. Cravo Sá A, Fermento A, Neves D, et al. Radiotherapy setup displacements in breast cancer patients: 3D surface imaging experience. *Rep Pract Oncol Radiother.* 2018;23(1):61-67. doi:10.1016/j.rpor.2017.12.007
6. Rigley J, Robertson P, Scattergood L. Radiotherapy without tattoos: Could this work?. *Radiography (Lond).* 2020;26(4):288-293. doi:10.1016/j.radi.2020.02.008
7. <https://visionrt.com/our-solutions/dosert/>
8. <https://visionrt.com/our-solutions/maprt/>

## | 当院におけるSGRT (IDENTIFY) の使用経験

滋賀県立総合病院 放射線治療部 西谷拓也  
滋賀県立総合病院 放射線治療科 山内智香子

当院では放射線治療棟 (1975年建設) の老朽化に伴い2024年10月より新しく放射線治療棟を開設し、外部放射線治療装置TrueBeam (Varian) とOXRAY (日立ハイテク) を導入しました。また密封小線源治療装置Flexitron HDR (Elekta)、放射線治療計画用CT装置SOMATOM go.Sim (SIEMENS) も更新しました。True Beamには体表面画像誘導放射線治療 (SGRT: Surface guided radiation therapy) を行うための体表面モニタリングシステムIDENTIFY (Varian) を装備しました。IDENTIFYは、天井に設置された3台のステレオビジョンカメラを搭載した光学式体表面モニタリングシステムで、追加の被ばくを伴うことなく、3次元の体表面データをリアルタイムで取得することができます (図1)。また、IDENTIFYでの患者セットアップはハンドヘルドデバイス (図2) を用いた管理により簡略化されており、効率的なワークフローを提供するシステム

になっています。

当院では乳癌術後照射のような表層に近い領域への照射を行う症例を中心にIDENTIFYを使用しており、執筆現在 (2025年4月) までに全乳房19件、全乳房+鎖骨上4件、胸壁+領域リンパ節照射11件の照射を行いました。IDENTIFYを使用する際の基準となる体表面は治療計画用CT画像から得られた体輪郭データです。基準体表面と現在の体表面を比較し、各方向の位置誤差を可視化することができます。位置誤差の方向は基準体表面より現在の体表面が高いと赤色、低いと青色、2mm以内で一致していると白色に表示されます。当院では、皮膚マーカを指標にセットアップ (主に体幹部) を行った後に、可視化された画像のカラー表示を確認しながら患者位置を調整 (主に腕や肩等の可動部分) します。また関心領域を設定することができ、設定関心領域と基準体表面との位置誤差が6



図1 TrueBeam・IDENTIFYカメラ  
3台のカメラで体表面をモニタリング

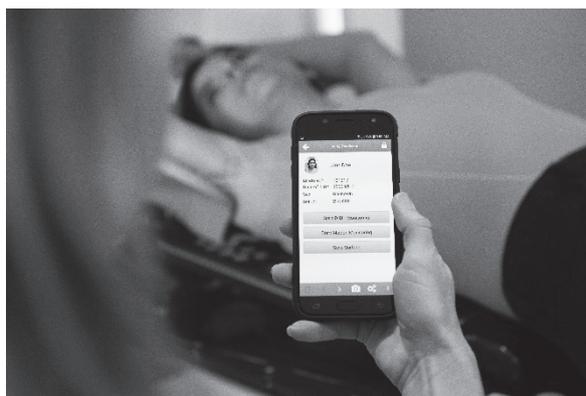


図2 ハンドヘルドデバイス  
小型のデバイスで、簡単な操作により管理が可能

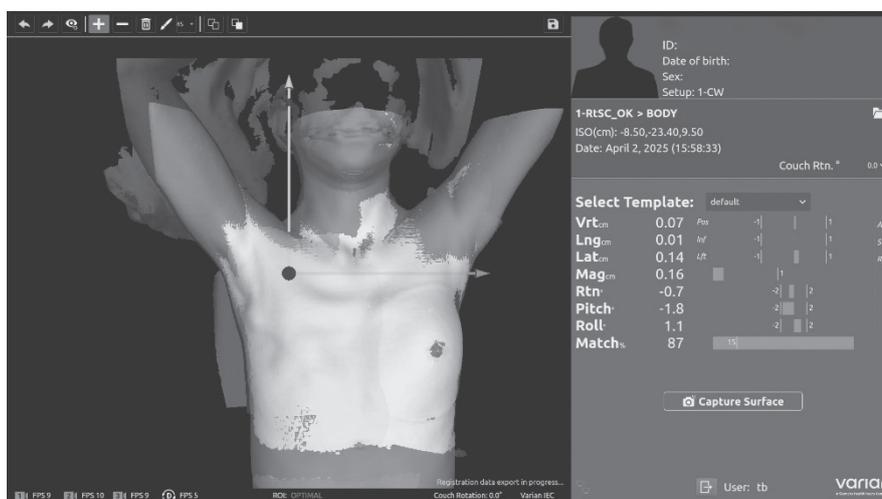


図3 IDENTIFYセットアップ画面  
位置誤差を6軸の数値表示

軸 (Vertical、Long、Lateral、Yaw、Roll、Pitch) で数値表示されます (図3)。

当院では関心領域を照射範囲に設定し、最終的に表示値が3mm以内になるように調整を行っています。IDENTIFYを使用し位置誤差が表示されることによって、従来の皮膚マーキングのみのセットアップに比べ少し時間は要しますが、セットアップの再現性は向上しました。

IDENTIFYは深吸気息止め (DIBH: Deep inspiration breath hold) 照射にも対応しており、自由呼吸およびDIBHの基準体表面データを個別に設定することができます。当院での左乳房・胸壁へのDIBH照射では、自由呼吸でIDENTIFYを使用せず皮膚マーカにてセットアップを行った後にIDENTIFYを使用してDIBHでセットアップを行っています。当初はAAPM TG-302において推奨されている通り、自由呼吸でIDENTIFYを使用してセットアップを行った後にDIBHでもIDENTIFYを使用しセットアップを行っていましたが、時間を要するため、自由呼吸で皮膚マーカに合

わせたセットアップ後にDIBHでIDENTIFYを使用したセットアップを行う運用になりました。

DIBHの呼吸管理はIDENTIFYを使用せず腹部にRGS (Respiratory Gating for Scanners, Varian) を設置しモニタリングしており、IDENTIFYは体表面の位置確認にのみ使用しています (執筆現在)。RGSを使用する理由としては、IDENTIFYに不具合が生じた際に外部治療装置とIDENTIFYの接続を切る必要があり、再起動に30分程度のロスタイムが発生するためです。将来、IDENTIFYと外部治療装置との連携が進めば、呼吸管理にも使用したいと考えています。また皮膚マーカレスの運用も可能ですが、同様の理由からマーカレスの運用には至っていません。

SGRTのその他の利点として患者の被ばくを伴うことなく照射中のモニタリングが可能であり、セットアップ後の体動を定量的に評価することも可能です。現在当院では、照射中のモニタリング結果を解析し、照射中に取得した画像から、定量的に治療精度の評価やマージンの算出を行うことを検討しています。

当院はSGRTを開始して間もないため、SGRT患者についてのカンファレンスを行い、患者ごとのセットアップ精度や息止めの精度等を医師、技師、看護師、物理士にて共有しています(図4)。また近年、乳癌の領域リンパ節への照射技法として強度変調照射の適用が注目されており、当院においても準備を進めています。強度変調照射によりターゲットへの線量を確保しつつ心臓や肺などの周囲危険臓器への線量を軽減するため、その位置精度を担保するIDENTIFYの有効性が期待されます。

以上、当院で導入したIDENTIFYによるSGRTの現状について報告いたしました。SGRTは、患者の負担軽減と治療精度の両立を実現し、放射線治療における新たなスタンダードとなると考えられます。

最後になりましたが、このような報告の機会をいただきました広報委員会の関係各位にお礼申し上げます。



図4 カンファレンスの様子  
多職種カンファレンスでSGRTの精度を検討

## ｜ Catalyst+ HDを用いた乳がん患者に対するマーカーレス運用

東京大学医学部附属病院 放射線部 松田佳奈子

### はじめに

当院で、体表面画像誘導放射線治療(Surface Guided Radiation Therapy: SGRT)装置のCatalyst+HD(C-RAD社製、以下Catalyst)を用いたマーカーレスでの乳がん術後照射における運用を始めて約1年が経過しました。本稿では、診療放射線技師の視点から、当院におけるマーカーレス運用への移行プロセスとCatalystの使用経験についてご報告します。当院の運用につきましては、装置導入時に金沢大学附属病院様に見学に伺い、多くの運用方法を取り入れさせていただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

### 当院について

東京大学医学部附属病院放射線治療部門は、常勤の放射線治療専門医6名、大学院在籍中の医師6名、常勤の医学物理士2名、看護師4名(日によって増減あり)、診療放射線技師10名が所属しています。

当院の治療装置は、VersaHD(Elekta社)2台、Tomo Therapy(Accuray社)1台、ガンマナイフIcon(Elekta社)1台、RALS Flexitron(Elekta社)1台で、Catalystは、2022年から2023年にかけて更新したVersaHD2台中の1台に導入されました。医師からの要望があり、2024年5月より領域リンパ節照射を伴う乳がん術後照射症例を対象にマーカーレス運用を始め、2025年1月からは全ての乳がん術後照射症例にマーカーレス

運用の対象を広げました。この1年で約90名に対してマーカーレスでの治療を実施しています。

### Catalyst+ HDについて

治療装置内に、1つのメインユニット、2つの追加ユニットがそれぞれ120°の角度で設置されており、LEDの光を体表面に投影し、CCDカメラで取得しています。使用に際しては、3つのモード:患者の位置決め、治療中の患者の体の動きの検知、呼吸同期治療用の各モードが使用でき、運動検知によって、患者の位置に変化がないことも監視可能です。位置決めの精度・動きの検出精度は剛体で0.5mm以内、最大スキャン範囲は、左右80cm×奥行き140cm×高さ100cm(アイソセンタとの相対値)、フレームレートは165フレーム/秒となっています。

治療計画用CT室内にはSENTINEL(C-RAD社製)があり、非接触で患者の体表面情報を取得できます。体表面上にプライマリーとセカンダリー2つのゲーティングポイントを画面上で設定することで呼吸信号を取得し、トリガーをCT装置に送ることが可能です。当院では現状、呼吸同期4DCTの撮影に用いていますが、以前使用していた接触での呼吸波形の取得に比べ、患者に触れることなく呼吸信号を取得でき、吸引固定具などとも干渉しないため、非常に効率が改善さ



図1 治療室内のCatalyst



図2 Catalystでの位置合わせ

れたと感じています。

### 皮膚マーキングからマーカーレスへ

Catalyst導入当初は、皮膚マーキングを用いた従来通りの位置合わせを基本とし、CatalystはIGRT前の補助的な確認手段として使用していました。

(1) マーカーレス運用への移行の初期段階として、まずはVolumetric Modulated Arc Therapy (VMAT)での治療も行っている乳房全切除術後照射 (Postmastectomy Radiation Therapy: PMRT) および領域リンパ節照射を含む乳房部分切除術後照射症例を対象に、CatalystでのSGRTを始めました。これらの症例では、毎回低線量のCone Beam CT (CBCT)を撮影して6軸補正で位置合わせをしていました。Catalystで並進方向1mm以内、回転方向1度以内の精度で位置合わせを行い、その後取得したCBCTによる位置補正量がCatalystによる位置情報とよく一致していることを確認しました。移行初期には、ポジショニングの目安として体表面に小さな点を3ヶ所マーキングしていた時期もありましたが、現在では計画CT時から治療終了まで、完全なマーカーレスで運用しています。

(2) 次の段階として、初回と中間の治療日にのみ低線量のCBCTを撮影している乳房部分切除術後の全乳房照射のみの症例に対しても、マーカーレス運用を導入しました。位置合わせが難しいと判断した症例については、最初の2~3回はCBCTで確認を行い、Catalystによる位置合わせの精度に問題がないことを確認した上で、マーカーレス運用へ移行しました。

(3) 一方で、全乳房照射後の電子線による腫瘍床へのブースト照射では、未だ皮膚マーキングを使用しています。治療計画装置で作成した治療計画に基づき、Catalystは位置合わせおよび照射中の体動監視にのみ使用しています。現行の運用では、まずツープスの無

い状態でCatalystによる位置合わせを行い、次に寝台を側方又は下方に一時退避させたうえでツープスを取り付け、医師と照射野を確認の上、体表面に照射範囲をマーキングして照射をしています。

移行当初は、体表面に投影された色と表示される移動量をもとに移動する方向の把握、合わせる順番や体表面の画像を確認しやすい向きに変更することに慣れる必要がありました。表示範囲の設定においても工夫が必要で、広範囲に設定しすぎると腹部の呼吸性移動を拾ってしまい、位置合わせに時間を要したり、治療中に意図しないアラートが発生しやすくなるため注意が必要です。

### 皮膚マーキング合わせとCatalyst合わせの比較

乳がん症例の照射は必然的にCatalystのある治療装置で優先的に行うこととなり、多い日には、照射症例の大半を乳がん症例が占めることもあります。かつては、マーキングが消えやすい患者には毎日、そうでない患者でも週に2回は皮膚インクを用いてマーキングを行っていましたが、マーカーレス運用への移行に伴い、インクの消費量が激減しました。

患者と医療者双方のメリットとして、保湿剤の使用などによるインクが薄れてしまうことや、連休前後でのマーキングの書き足し作業が不要となり、またインク成分による皮膚のかぶれなどの懸念が解消したことなどが挙げられます。

精度面では、Catalystを用いたSGRTの導入後、治療期間中のIGRTでの補正量が、従来よりも減少した印象です。その理由として、皮膚マーキングによる位置合わせと比較して、Catalystでは色や数値で客観的な評価が可能のため、技術者間の誤差が低減された可能性があります。

皮膚マーキングで合わせていた時には不安のあっ

た、顔の向きや顎・腕の上げ具合についても、Catalystを用いることで、計画CT時の通りに再現できていることが確認できるようになりました。ただし、そのためには計画CTの撮影範囲をSGRTの際に腕や顎の上げ具合も確認できるよう、上端は顎付近まで含めるなど、広めの範囲で撮影を行う必要があります。

IGRT時には、位置補正に伴い体表面が基準位置に追従する様子を視覚的に確認できるため、6軸補正が正確に機能していることの実証が得られ、安心して治療を進められます。

治療中の監視についても、咳やくしゃみなどの突発的な動きにも対応でき、治療時間が延長した際にも動いていないことが確認できるなど、Catalystの設置されていない他の治療装置に比べて、安全管理の質が大幅に向上したと感じています。

## 乳がん症例以外にも活用

Catalystは乳がん症例以外にも、マーキングが困難な顔面の緩和照射や、四肢の照射時の微妙な傾きの調整など、様々な部位で活用されています。また、当院では2023年4月からTotal Body Irradiation (TBI)をVMATで行っており、その際の体のローテーションに加え、肩の位置の上下や指先の位置まで詳細に合わせることが可能です。

医療安全の面でも、Catalystの使用によって患者の取り違えや照射部位や左右の誤認防止にも役立っており、安全な放射線治療の提供に貢献しています。

以上、Catalystを用いた当院でのマーカーレス運用を中心に述べました。今後は、Deep Inspiration Breath Hold (DIBH)の導入や、電子線照射におけるマーカーレス化を進めるなど、Catalystのさらなる活用に取り組んでいく予定です。

## 乳癌放射線治療の新たなスタンダードへ

### ——体表面照合システム「ExacTrac Dynamic」がもたらす革新

広島市立広島市民病院 放射線技術部 新谷育美  
広島市立広島市民病院 放射線治療科 松浦寛司

当院では2023年9月にExacTrac Dynamic (ブレインラボ社)を導入し、乳癌SGRTを開始した。非侵襲的にリアルタイムで体表面を追跡できるExacTrac Dynamicの導入は、治療精度と患者の安心感の両立を実現する大きな一歩となった。本稿ではExacTrac Dynamicの概要と、導入から実臨床での使用経験を交えながら、当院での乳癌SGRTへの取り組みを紹介する。

### ExacTrac Dynamicの仕組みと特長

ExacTrac Dynamicは、従来のExacTrac systemに4D thermal cameraを兼ね備え、X線照合機能に体表面照合機能を融合した革新的な照合システムである。4D thermal cameraは高精細構造化ライトプロジェクターと立体低遅延データカメラ、一体型thermal cameraで構成されている。プロジェクターと立体低遅延データカメラによって300,000点の3Dサーフェスポイントが取得され、患者の体表面を数ミリ単位で立体的に解析する。これにより乳房や胸郭の動きをリアルタイムに捉えることができ、皮膚へのマーキングなくセットアップ可能である。

実際の治療時には、リニアック室内のモニターで図1のような画面を見ながらセットアップを行う。画面

上の「Send Shift」ボタンを押すと、セットアップ時の位置とアイソセンタ位置の補正移動量が寝台へ送信され、自動で移動する。このときの寝台移動は3軸の並進移動である。

### システム導入時の準備とセットアップフローの決定

ExacTrac Dynamicの臨床使用に向けて、体表面照合機能の精度検証を行った。その具体的な方法と結果を述べる。

まず、ファントムを用いた模擬Planを作成した。次に、ファントムを治療寝台に設置し、ExacTrac Dynamicを用いてセットアップを行った後、CBCTによる画像照合で位置精度を確認した。このとき、意図的にファントムにPitchやRollをつけた状態や、バスタオルをかけた状態での検証も行った。

CBCTでの照合結果は、タオルをかけた場合を除き位置誤差0.3mm、0.2度以下であり、ExacTrac Dynamicで正確に体表面照合できた。ファントムを意図的に回転させた場合もExacTrac Dynamicが示したPitch、Roll、Yawの値とCBCTでのこれら3軸のカウチシフト量はおおそ一致していた。タオルをかけた状態ではタオル表面を体表面と認識し、特にVertical方向で誤



図1(a) 「Send Shift」前（セットアップ中）

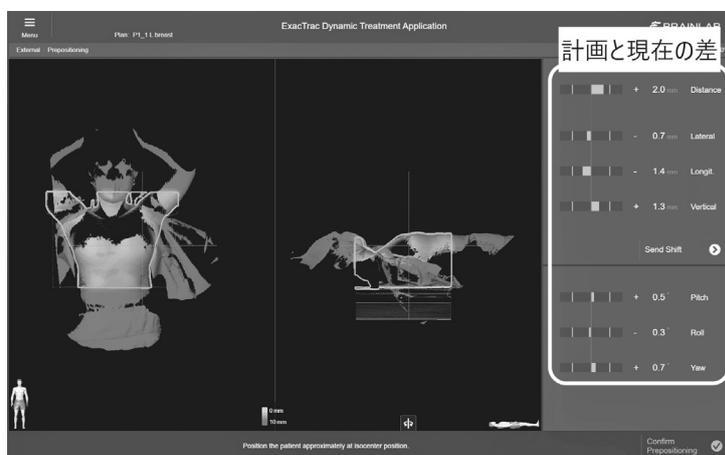


図1(b) 移動後（セットアップ完了時）

差が大きくなることがわかった。

以上より、当院では以下のようにセットアップフローを決定した。

- ①胸部を露出させ、レーザーで正中を確認し体軸をまっすぐに補正
- ②ExacTrac DynamicのモニターでPitch・Roll・Yawを確認、修正（1度以内）
- ③「Send Shift」ボタンを押しアイソセンタまで移動
- ④治療衣を被せる

セットアップ後はField Lightで照射野を確認し、そのまま照射することを目標としたが、導入後しばらくの間はEPID照合も行い確認することとした。

### 臨床使用開始後の課題と取り組み

乳癌SGRT導入後1症例目のEPID照合の際、DRR画像と比較して高さが4～5mm程低めにずれていた。このずれは同症例の別日や2症例目以降でも同様に認められた。このことから、シミュレーションCT時やセットアップ時の患者の呼吸が原因ではないかと考えた。

通常、吸気と呼気の時間的比率は1:2から1:3で呼気時間が長い。自由呼吸下でのヘリカルCTは呼気時の画像に寄っている可能性が高い。また、ExacTrac Dynamicからリニアック寝台へ送信される移動量は「Send Shift」ボタンを押した時点での体表面位置から計算される。すなわち、吸気（胸の位置が高い状態）で「Send Shift」すると寝台は低い位置にシフトされる。この状態でEPID照合を行うと、胸の位置が低めにずれてしまう。

当初「Send Shift」するタイミングにルールは設けていなかったが、以上のことをふまえて、患者の胸郭の動きをもとに呼気のタイミングで「Send Shift」ボタンを押すよう試みた。その結果、EPID照合での誤差は小さくなり、体表面照合でDRR画像と一致するようになった。以降「Send Shift」ボタンは呼気時に押すようセットアップフローを見直し、治療開始日から3日間はEPID照合で確認しながら、今日までスムーズに乳癌SGRTを実施できている。（図2）



図2 セットアップ風景

### 乳癌SGRTにおける実感——私見と患者の声

ExacTrac Dynamicの導入により乳癌SGRTを開始し、完全マーカーレスで治療を行えるようになった。当院で体表面マーキングを用いていたときは、印を消さないように気を遣いながら過ごすことにストレスを感じている患者や、洋服の首元から印が見えることやインナーにインクが写ることを気にしている患者は少なくなかった。加えて、体の印が病気の象徴のようで嫌だという意見もあったが、マーカーレス治療によりこれらのマイナス点はすべて解消され、好評を得ている。また、リニアック室に案内してから照射を終えて退室するまでの時間は以前の7～8分から約4分と大幅に短縮された。特に乳癌術後照射の場合、上半身を露出する時間が短いことや、マーキングのために乳房にペン先等が触れることがないということは心理的ストレスの軽減に繋がり、精神的にもより優しい治療の提供を可能にした。

## VOXELANによる乳癌SGRT

### VOXELANとは

光学式デバイスを使用した患者セットアップ・治療中の監視技術である体表面画像誘導放射線治療 (surface-guided radiotherapy: SGRT) が、非常に注目されている。SGRTに使用する機種は本特集でも紹介されているような海外ベンダーから販売されている装置が広く普及しているが、一方で、日本国内のみで販売されている国産装置 VOXELAN も国内複数の医療機

私たちが技師にも多くのメリットがある。まず熟練度によるマーキングの差や、日々印を描き足すことによるずれがなくなった。また、視覚情報で素早くセットアップでき、マーキングの手間もなくなったため、スループットの向上にも繋がった。さらに、カウチが低い状態でも体表面が認識されるため、小柄な技師でも無理なくセットアップできるようになったのは大きな利点である。

### 今後の展望

ExacTrac Dynamicで「Send Shift」する際、技師が患者の胸郭の動きをもとに呼気のタイミングを見計らってボタンを押しているが、患者の呼吸を認識し呼気時の体表面位置から寝台移動させる機能があれば、より短時間で精度の高いセットアップが可能となる。これに関してブレインラボ社は、自由呼吸時の平均的な胸の位置 (ベースライン) を取得しリニアック寝台への補正移動量を計算させる機能の実装に向け、「Send Shift」に関する機能改善の要望をドイツ本社へ上げている。

このようにブレインラボ社には、メーカーとユーザーが一緒になって話し合い、次のバージョンで改善させていく「Product feedback」という取り組みがある。ユーザーが感じた使用上の課題や注意点が素早く本社まで届き改善に繋がっていることに驚きと期待を感じた。この取り組みにより、ExacTrac Dynamicはさらに臨床に寄り添った発展を遂げられると思われる。今後も医師や技師、看護師、メーカーとも意見を交わしながらより患者に優しい治療を提供していきたい。

(参照 <https://x.gd/dCksh>)

山梨大学医学部 放射線医学講座 齋藤正英  
山梨大学医学部附属病院 放射線技術部 上田幸治  
山梨大学医学部 放射線医学講座 大西 洋

関で導入実績がある装置である。VOXELANは、イーアールディー社製のSGRT装置であり、当院においては2018年5月に、Elekta Synergy®との組み合わせで導入された。VOXELANはサードパーティーのSGRTベンダーとして、Elekta社リニアック、Varian社リニアック、Accuray社リニアックと同室の取り付けが可能であり汎用性は高い。ただし、装置との連携 (ビーム同期、寝台移動) については対応していない。

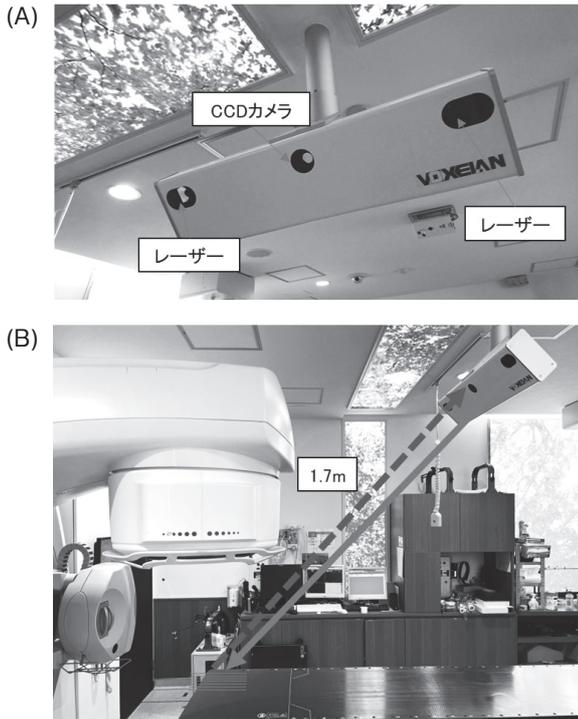


図1 VOXELANの外観

A：2つのレーザー出射口とCCDカメラからなる検出ヘッド。  
 B：リニアックとの位置関係。検出ヘッドからアイソセンターまでの距離は1.7 mであり、頭尾方向にレーザーを走査し（矢印）、明るさの変化をCCDカメラで検出する（破線矢印）。

VOXELANのハードウェアの外観を図1に示す。図1Aに示したカメラ（検出ヘッド）は天井吊り下げ式の1カメラ方式で、検出ヘッドの照射される2つの赤色のスリットレーザー光を患者体表面に走査し、CCDカメラで撮影し画像化する。画像は「投光角度画像」、「最大輝度画像」および「最小輝度画像」の3つの画像を作成し、コンピュータで三角測量の原理に基づいて三次元立体形状を作成している。なお、当院に設置したVOXELANは検出部からアイソセンターまでの距離が1.7 mである（図1B）。また、図2にVOXELAN専用の位置決め支援ソフトウェアのユーザーインターフェースを示す。位置決め支援ソフトウェアは2種類のモードが使用可能であり、1つは位置決めモードであり、通常の患者セットアップに使用されるモードである（図2A）。位置決めモードのフレームレートは2 fpsであり、計測範囲（field of view：FOV）は横450 mm×縦600 mmである。特徴としては、検出ヘッドで撮影したリアルタイム体表面画像と基準体表面の6軸補正量がバー表示として可能であり、施設ごとに許容値の閾値を設定することが可能である。また関心領域（region of interest：ROI）は矩形として設定可能である。さらに、断面表示が可能であり、セットアップ時

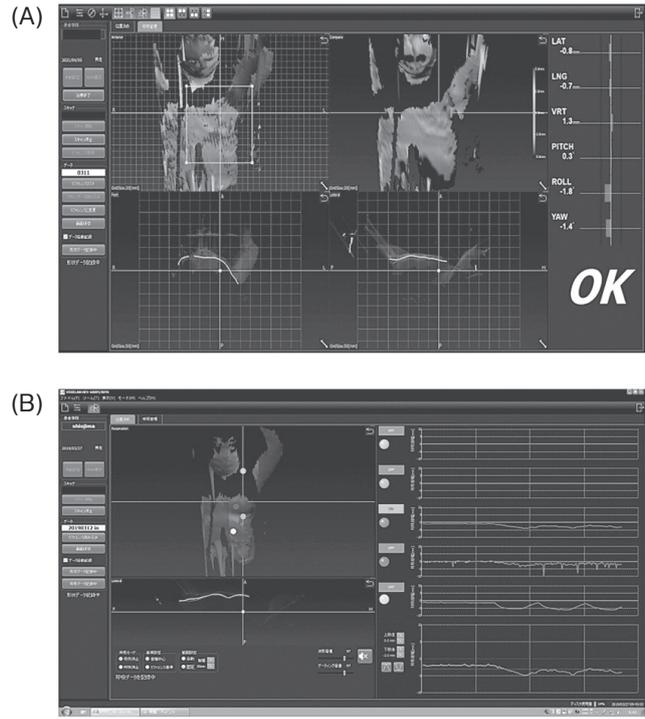


図2 VOXELANの位置決め支援ソフトウェアの外観

A：位置決めモードのユーザーインターフェース  
 B：呼吸管理モードのユーザーインターフェース

には参考にしやすい仕様となっている。位置決め支援ソフトウェアのもう1つのモードとして呼吸管理モードがある（図2B）。呼吸管理モードのFOVは横150 mm×縦600 mmであり、フレームレートは12 fpsである。特徴としては、呼吸を認識する点として任意の5点が設置可能であり、それぞれの呼吸波形に対して閾値が設定可能で、平均呼吸波形も作成することができる。また、コーチング機能としてゴーグルを用いた視覚ガイドや音声ガイドも使用することができる。

### VOXELANによる乳癌治療

当院ではVOXELANを用いた乳癌SGRTを実施しており、適応症例に対してはIGRT加算（体表面の位置情報によるもの）を算定している。臨床使用のワークフローとして、まず治療計画立案後、リファレンス画像作成ソフトウェアに治療計画データを転送する。なおリファレンス画像作成ソフトウェアでは、治療計画装置から出力したDICOM RT structureの体輪郭はもちろん、治療計画CTから独自の閾値処理で算出した体輪郭も基準画像として使用可能である。基準画像を登録した後、Alignで基準体輪郭を読み込み、SGRTセットアップを実施する。SGRTセットアップの際は、カ

ラーマップだけでなく断面表示も参考にしながら実施することが多い。また、治療計画CTから作成した基準画像は潜在誤差を含む可能性があるため、SGRTセットアップ後のIGRTの照合結果もふまえながら、その後の基準画像をスキャン画像に変更することもある。乳がんSGRTの場合は毎回の治療直前照合時のキャプチャ画像を保存し、結果を管理している。照射中の監視は、乳癌であれば呼吸管理モードで実施することが多い。特に左乳癌の深吸気息止め（DIBH）照射の場合で吸気量の確認に使用している。またVOXELANは1カメラ方式であるため、状況によっては乳房の一部が欠損する可能性があり、専用の固定具を使用することも検討するべきかと考える。

また、今後の検討課題としてVOXELANによる皮膚マーカーレス照射の実施が挙げられる。臨床では、初回治療時や治療期間中に皮膚マーカーが消失する症例をしばしば経験する。さながら皮膚マーカーレスの状態であるが、VOXELANの使用により精度の高い

セットアップおよびCBCTの再撮回数低減を実現できている。当院では現在、積極的な皮膚マーカーレス照射は実施していないが、これまでの経験をふまえて、SGRTセットアップ後に必ずIGRTを実施する症例であれば、完全マーカーレスに移行できる可能性がある。VOXELANの特性を理解し、かつ皮膚マーカーレスに潜在的に起因する故障モードによる影響を精査しながら、今後より詳細に検討していく予定である。

### おわりに

唯一の国内ベンダーのSGRT装置であるVOXELANについて、装置の詳細と乳癌での使用経験について解説した。サードパーティーのSGRT装置であるため幅広いリニアックの機種で使用可能であり認識精度も良好である一方で、治療装置と未連携である点や、1カメラ方式限定である点は他ベンダーの製品とは異なるため、装置の特性は導入の際に十分に把握しておくべきである。