

サイバーナイフのロボット精度により 達成される良質な線量分布と 4次元的位置補正

水野裕一

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

Key
Words

●ノンコプラナ照射 ●治療中の位置照合

本邦において定位放射線治療の保険適応も拡大し、世界的にも寡分割照射の流れが進んでいる¹⁾。定位放射線治療、寡分割照射において重要な点は線量分布の質と位置精度である。サイバーナイフは、高い位置再現性を有したロボット動作、それが可能とする超ノンコプラナ照射、そして治療中の画像取得・位置誤差補正機能を有する。このシステムを用いて良好な線量分布、高い位置精度による照射を達成可能とする。

はじめに

定位放射線治療の診療報酬適応は拡大され、現在は以下の症例が適応となっている。原発巣が径5 cm以内であって、転移病巣のない原発性肺癌、原発性肝癌、または原発性腎癌、3個以内で他病巣のない転移性肺癌、転移性肝癌、転移病巣のない限局性の前立腺癌、または膀胱癌、直径5 cm以下の転移性脊椎腫瘍、5個以内のオリゴ転移、脊髄動静脈奇形である。照射回数を減らして1回に照射する線量を増加させる寡分割照射も、その有用性が認められ、乳癌や前立腺癌に対して診療報酬が適応されている²⁾。その有用性は、米国から「前立腺がんに対する寡分割照射のガイドライン」として報告がある³⁾。

高精度放射線治療として寡分割照射でも用いられる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) は、いずれの照射技術も腫瘍に対して線量集中度を高め、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。

症例によっては、リスク臓器がターゲットに近接していることもあり、腫瘍と正常組織間の線量勾配を急峻に設定する必要がある。その際、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技術を併用する必要があり、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。しかし、照射中は固定具による補助はあるものの、患者の体動や体内臓器の動きが起こりうる。この不確かさに対して、PTVマージンや固定具技術による対応、そして治療計画時からの体型変化や体内臓器の形状変化に合わせる適応放射線治療により対応している。

サイバーナイフでは上記の実現のため、ロボッ



図1 サイバーナイフシステムの概要

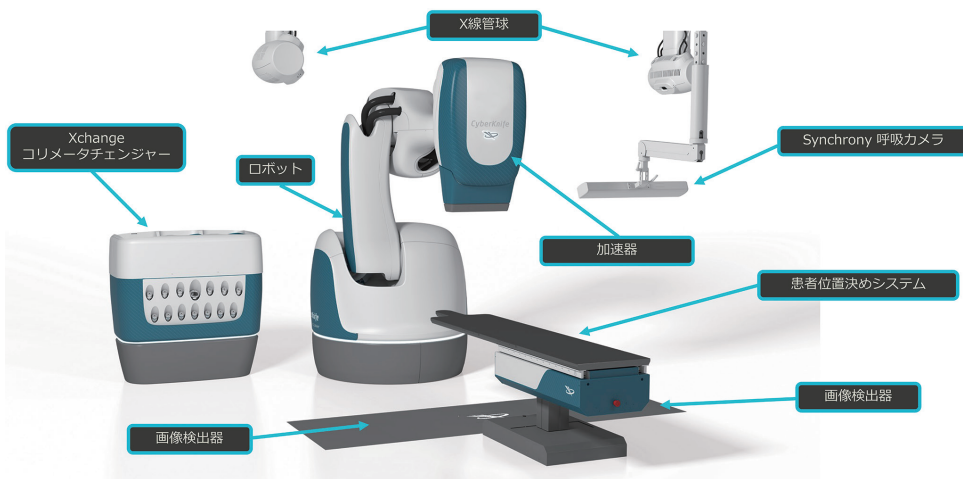


図2 サイバーナイフの構成

トアームによる多方向からの照射、治療中の動きを捉えるための位置精度補正機能という独自のシステムを有している。以下では、サイバーナイフのシステム、構成、位置補正、治療時間、線量分布と、臨床成績に関して説明する。

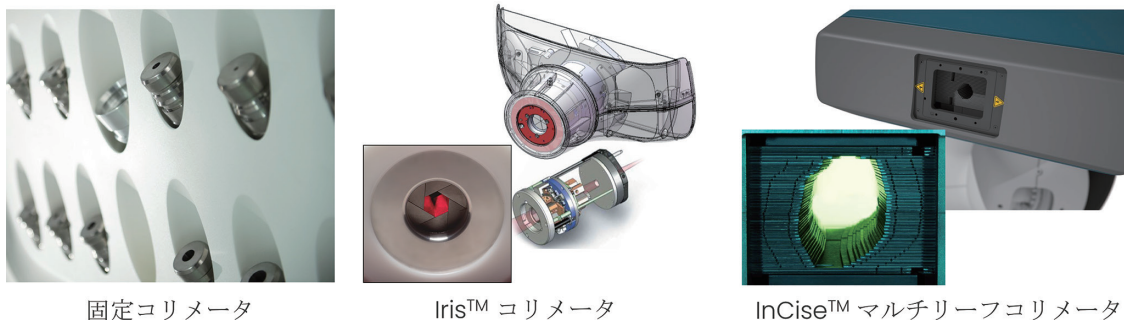
サイバーナイフの治療実行システム

サイバーナイフシステムは、ロボットマニピュレータと軽量の小型直線加速器を用いて設計され、高線量をサブミリメートルの精度で照射することができる初のロボット放射線手術システムである(図1)。独自のロボット機動性により、多方向からノ

ンコプラナ照射を実行でき、複雑な形状の腫瘍でも高い線量集中性、正常組織への線量の最小化を、急峻な線量勾配により実現できる。また、治療中の画像照合を用いて常に腫瘍を自動的に検出・追尾することにより、ゲーティング法や息止め法、侵襲的な固定具などを用いず、呼吸性移動を伴う腫瘍も治療が可能である。一般的には、治療中の動きをPTVマージンに含めているため、このシステムではより小さいPTVマージンも可能となる。

サイバーナイフの構成

サイバーナイフは図2のように構成されている。



固定コリメータ

Iris™ コリメータ

InCise™ マルチリーフコリメータ

図3 サイバーナイフで使用されるコリメータ

ロボットマニピュレータは6軸で稼働しており、ポーズ再現性は0.06 mm、アイソセンタ精度は0.2 mm 以下である。光照射野がない代わりに、ビーム軸に一致した光レーザーで位置確認をしており、その精度は±1 mm 以下である。ロボットに搭載された軽量、小型の直線加速器は6 MVのX線エネルギーを使用、線量率は800 MU/minで**図3**のように3種類のコリメータを有する。固定コリメータは直径5~60 mmの12種類を有し、透過率の平均値は0.2%未満である。Iris™コリメータは可変の六角形のコリメータが2重構造となっており、12角形の照射野を形成可能である。固定コリメータ同様12種類のサイズを形成可能で、コリメータ材質はタングステン、サイズ再現性は800 mm SADにおいて0.2 mm 未満である。InCise™マルチリーフコリメータは52枚のタングステンリーフで構成されており、最大照射野サイズは115 mm×100 mm、最小照射野サイズは7.6 mm×7.7 mm、アイソセンタ位置でのリーフ幅は3.85 mmである。SAD800 mmにおける位置再現性は0.95 mm 未満である。これらのシステムが、多方向からのノンコプラナ照射を可能とする。カウチには2種類あり、5軸補正が可能な標準治療ベッド、6軸補正可能なRoboCouch®となる。治療中の動きを捉えるためのX線管は固定開口型で40~150 kVp、平面検出器は間接式のフラットパネルディテクタで、1,024×1,024のピクセル数、実画像領域は40.4 cm×40.4 cmである。呼吸性の動きを捉えるシステムとして、synchrony呼吸カメラがあり、30 Hzの赤外線カメラにより、LEDマーカを認識する。

動きを捉えるシステム

治療中のターゲットの動きを継続的に把握して照射を行うことは放射線治療における課題の一つだが、サイバーナイフシステムは、頭頸部・肺・脊椎・肝臓・膵臓・前立腺など、治療部位に合わせた追尾・位置補正機能を備えている(**図4**)。治療が開始されると、治療実行用ソフトウェアがロボットマニピュレータ・寝台・画像システムの動作や相互の交信を制御し、治療中に取得したライブ画像をDRR画像と照合し、自動的かつ即座に補正值を算出する。この補正值に基づいてロボットマニピュレータの動きを補正し、ビーム照射角度・タイミングを患者状態に合わせる。

サイバーナイフシステムの追尾・位置補正機能の概要として、次のものが挙げられる。ただし、製品バージョンやオプションの組み合わせにより異なる。

Synchrony Skull Tracking：頭蓋骨の骨格構造を利用することで、侵襲的な頭部固定用フレームが不要になり、頭蓋の位置を継続的にモニタし、治療照射中のターゲットのわずかな並進・回転の動きも自動補正する。

Synchrony Fiducial Tracking：金マーカを留置して追尾・位置補正を行い、肝臓、前立腺などの治療に使用する。

Synchrony Spine Tracking Supine：マーカは用いず、脊椎の骨格構造を利用して腫瘍位置を自動検出・追尾し、脊椎内やその近傍に位置する症例において、高精度な放射線治療が実行可能である。

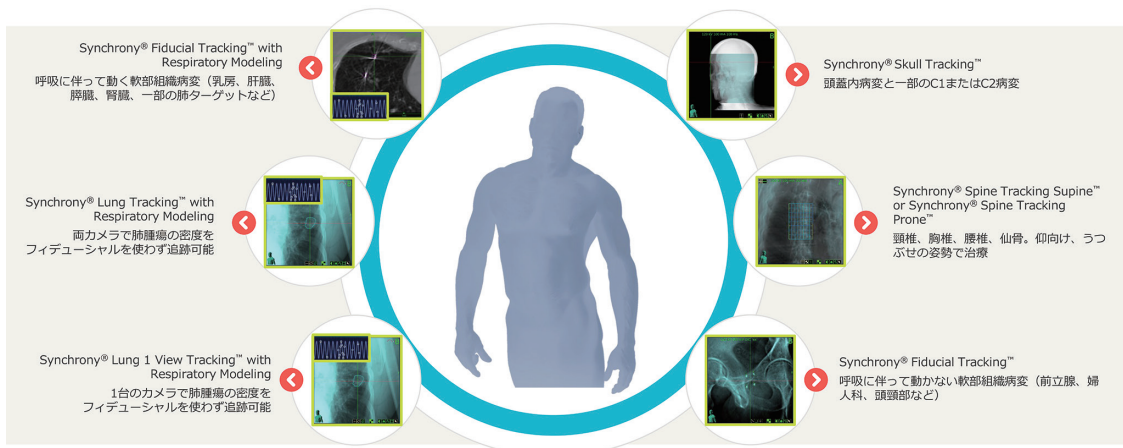


図4 サイバーナイフのトラッキング方法

呼吸追尾システム：治療を中断させたり、患者を移動させたりすることなく、腫瘍の呼吸性移動にビーム照射位置を同期するため、ゲーティング法や息止め法が不要で、マージンも減らすことができる。腫瘍の動きと呼吸波形の変化から両者の関係性をモデル化し、定期的に更新するため、時間経過による呼吸の変化に対しても対応可能である。

Synchrony Lung Tracking with Respiratory Modeling：呼吸追尾システムとともに使用することで、肺腫瘍そのものを追尾する。腫瘍を治療中に画像検出できるという条件下では、肺がん治療における金マーカの留置手術が不要となる。

これらの位置補正は治療中に実行されており、いずれのトラッキング手法においても、継続的な補正を可能としている。補正時間間隔の範囲において、タイミングに応じた位置補正が行われることから、4次元的な位置補正が実現されている。

治療時間の変遷

放射線治療において、1回の放射線治療にかかる時間は重要な要素である。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するためである⁴⁾。図5に示すようにサイバーナイフの進化に伴い、治療時間の低減も進んできた。Iris™ コリメータ搭載により、固定コリメータで必要だった交換時の

治療中断がなくなり、InCise™ マルチリーフコリメータの搭載により、照射野形状パターンが大きく増えた。同じ方向からさまざまな照射野形状での照射が可能になったことで、ロボットマニピュレータの移動距離が短縮された。それと並行して治療計画装置の進化により、アルゴリズムが改善され、治療時間の短縮に貢献している。

良質な線量分布と治療成績

従来の3DCRTから定位放射線治療への移行へは、ノンコプラナを含めた多方向からの照射により、線量集中性を達成した。固定多門IMRTからVMATへの移行では、5門~7門程度のガントリ角度からの照射から179コントロールポイント、見方を変えれば、179門照射に近い方向からの照射により、ターゲット周辺組織への線量を分散し、正常組織の線量低減を可能とした。このことから、ノンコプラナ照射、多方向からの照射が線量分布を、より理想の形へ導くことがわかる。サイバーナイフは独自のロボット機動性により、汎用機では模倣できないレベルのノンコプラナ照射、多方向からの照射を可能とする。図6上段は聴神経腫瘍の線量分布（左からAxial像、Sagittal像）とビーム入射図を示す。PTV 辺縁から処方50%線量までの距離が約2.5 mmとなっており、1 mm当たりの線量勾配は約20%である。ほぼ全周性にそれを達成しており、非常に急峻な線量勾配を達成でき

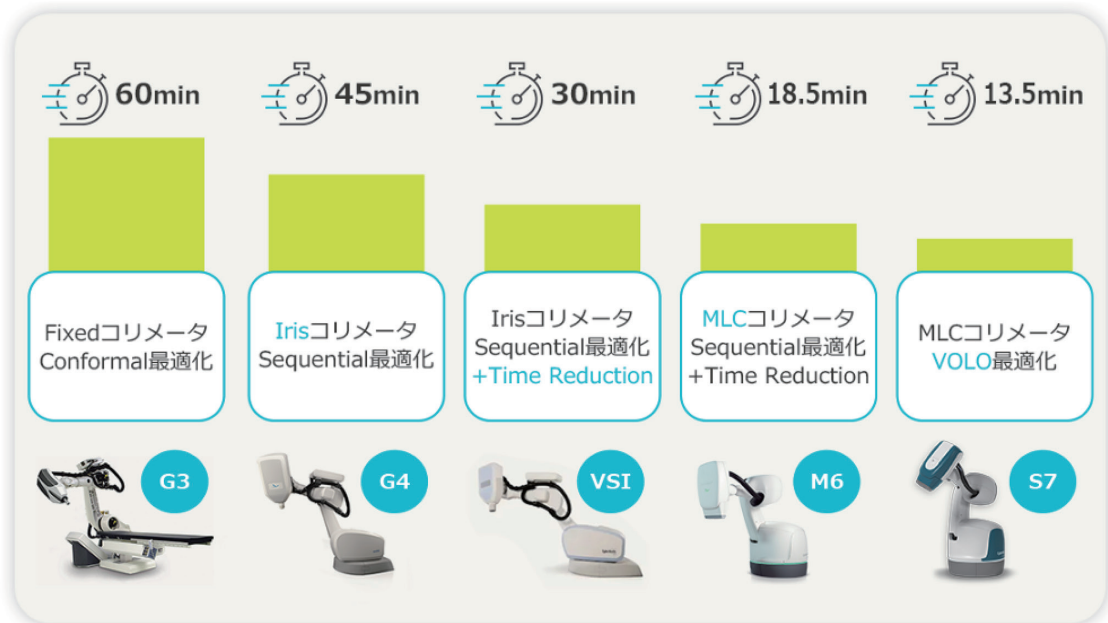


図5 サイバーナイフの進化と治療時間の変遷

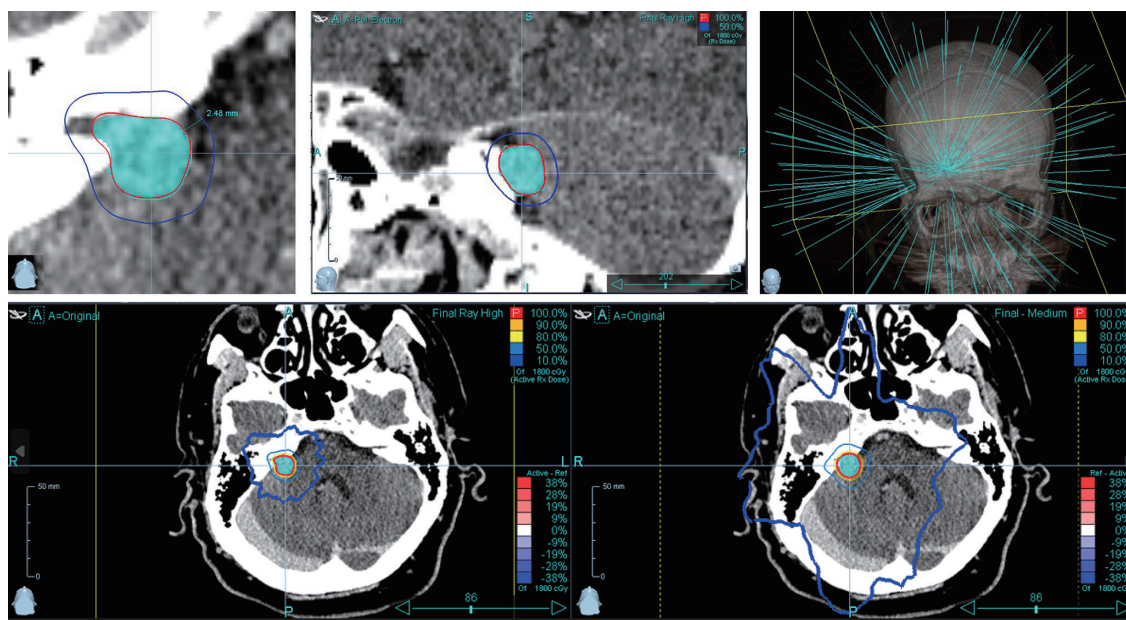


図6 上段：聴神経腫瘍の線量分布、下段：サイバーナイフvs コプラナ型VMATの比較

ていることがわかる。図6の下段は左図がサイバーナイフの線量分布、右図がコプラナ型のVMAT線量分布で、水色が処方50%線量域、青色が10%線量域を示す。線量勾配、低線量の広がりともに、サイバーナイフが優れていることがここか

らもわかる。

サイバーナイフシステムは前立腺の超寡分割照射も可能としており、1~2週間、5回の照射で治療を完遂できる。PACE-Bでの報告では、従来の2 Gy、39回の照射+3.1 Gy、20回の照射群と比較

して、泌尿器系、消化器系の急性障害を増加させないことを示唆した⁵⁾。また、超寡分割 SBRT 群のうち、サイバーナイフ治療群と汎用機治療群では、泌尿器系毒性発生率が、それぞれ12.4%、30.6%でサイバーナイフ治療群の方が有意に減少した。NCCN ガイドラインにおいても超寡分割照射は低リスク、良好な中リスクの前立腺癌患者の標準治療とされている⁶⁾。

前立腺は治療中も動いており、それを考慮した PTV マージン設定が必要となる。Christoph らの報告では、300秒の治療の場合、PTV マージンは左右方向2.6 mm、背腹方向5.3 mm、頭尾方向5.6 mmを推奨した⁷⁾。サイバーナイフでは治療中の位置誤差補正が可能であるため、40秒ごとの補正があれば、左右方向0.55 mm、背腹方向0.85 mm、頭尾方向1.05 mmを推奨とした。サイバーナイフの治療中の位置補正はPTV マージンの低減に大きく貢献する。

多方向のノンコプラナ照射および治療中の継続的な体動、臓器の動きの補正により、良好な線量分布を得ること、そしてより小さいマージンによる寡分割照射を実現している。

おわりに

多方向のノンコプラナにより良質な線量分布を得ることができるロボットシステム、そして治療中の動きを継続的に捉えて位置誤差を補正する4次元的位置補正機能を有するサイバーナイフに関して述べた。サイバーナイフのシステムにより、特に定位放射線治療、寡分割照射において、大き

くその性能を発揮し、ターゲットへの線量集中性、正常組織への線量低減の両者を満たすことができ、治療成績にも大きく貢献できる革新的なシステムである。

参考文献

- 1) American Society for Radiation Oncology (ASTRO) Annual Meeting. 2022. <https://www.cancernetwork.com/view/2022-astro-round-up-a-shift-toward-a-new-standard-of-care-in-radiotherapy-and-reducing-cancer-treatment-duration> [2023.7.27 参照]
- 2) 厚生労働省保険局医療課：令和4年度診療報酬改定の概要医療技術，2022. <https://www.mhlw.go.jp/content/12400000/000954826.pdf> [2023.7.31 参照]
- 3) Morgan SC et al: Hptofractionated Radiation Therapy for Localized Prostate Cancer: An ASTRO, ASCO, and AUA Evidence-Based Guideline. J Clin Oncol 36 (34): 3411-30, 2018
- 4) 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
- 5) Douglas HB et al: Intensity-modulated fractionated radiotherapy versus stereotactic body radiotherapy for prostate cancer (PACE-B): acute toxicity findings from an international, randomised, open-label, phase 3, non-inferiority trial. Lancet Oncol 20 (11): 1531-43, 2019
- 6) National Comprehensive Cancer Network. Prostate Cancer (version 1.2019). 2019. https://www.nccn.org/professionals/physician_gls/pdf/prostate.pdf
- 7) Christoph O et al: Intrafraction Prostate Motion Management for Ultra-Hypofractionated Radiotherapy of Prostate Cancer. Curr Oncol 29 (9): 6314-24, 2022

販売名：サイバーナイフ M6 シリーズ

(医療機器承認番号：22600BZX00126000)

販売名：サイバーナイフ ラジオサージェリーシステム

(承認番号：22200BZX00721000)

販売名：Accuray Precision 治療計画システム

(医療機器承認番号：22900BZX00031000)