

高精度放射線治療の さらなる進化を目指して

築瀬牧子／門間智之

アキュレイ株式会社 マーケティング部

呼吸性移動対策技術

『Synchrony® オプション』について

Synchrony®はサイバーナイフ®システム(アキュレイ株式会社)の動体追尾機構として開発された。照射中、並行して取得したkV-X線画像および体表LED信号より自由呼吸下での標的移動モデルを構築し、治療中の標的の動きに追従して照射ビーム位置を補正する。本機構を用いることで、より小さいPTVマージン設定を行うことが可能である。

今回、あらたにラディザクトシステム(アキュレイ株式会社)に実装されたSynchrony®オプション(以下、Synchrony)について、機構、動体追尾プロセス、および臨床的知見を紹介する。

1) Synchrony 機構

SynchronyではkV-X線画像から読み取った標的腫瘍またはFiducialマーカの位置情報とLED信号から算出された呼吸位相情報とを用いて治療中の腫瘍位置を予測する。

ラディザクト筐体内、小型加速管に対して垂直な位置に搭載したフラットパネルディテクタおよびkVイメージングソースでkV-X線画像を取得する(図1左)。また、体表に貼付したLED信号を天井から懸架したシンクロニーカメラで読み取り(サンプリングレート:最大100Hz)、治療中の呼吸波形をモニタリングする(図1右)。



図1 ラディザクトSynchrony筐体図

左: フラットパネルディテクタ/kVイメージングソース/小型加速管

右: シンクロニーカメラ/LEDマーカ

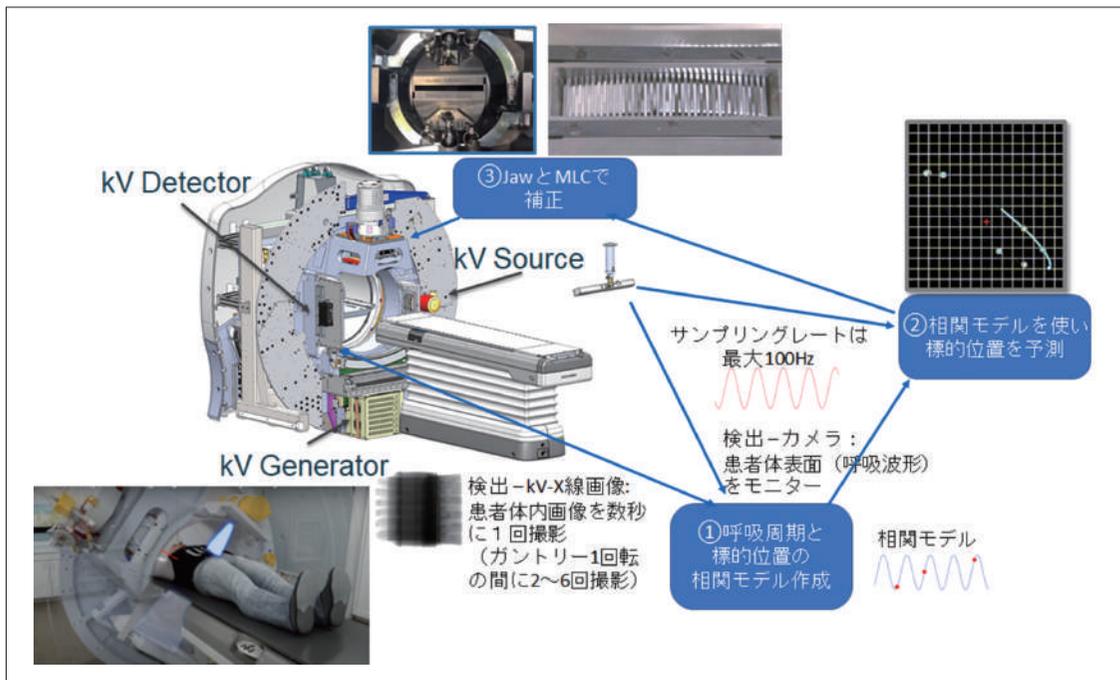


図2 動体追尾プロセス

2) 動体追尾プロセス

kV-X線画像(数秒毎に撮影)上の標的位置とLED信号から算出される呼吸周期を相関させ、①呼吸位相による標的位置相関モデルを作成する。②この相関モデルから、標的位置を予測、③照射ビームをJaw、MLCで補正し、呼吸性移動に準じた追尾照射を行う(図2)。腫瘍位置を適切に追尾するように、相関モデルは治療中、継続的に更新される。

kV-X線画像は、標的を治療中常にモニタできるように、2~6カ所の撮影角度を設定する。角度設定はシステムが支援し、推奨角度が色別に表示される(図1左)。kV-X線画像は画像取得の追加時間なくビームオン時も連続的に取得されるため、治療時間を延長せずに追尾照射を継続できる。また、肺腫瘍自体が標的と認識できる場合はマーカレス治療が可能となる。Synchrony使用時のkV-X線画像撮影に伴う被ばく量は、汎用機によるCBCT画像取得時の一般的な被ばく量を超えることはない。

照射ビームの補正は、S/I方向はダイナミックジョー、A/P方向、L/R方向はバイナリーMLCの動きによってそれぞれ補正される(図3)。

3) 臨床的知見

適応患者条件(一般的な推奨事項)としては、標的が直径8cm以下の球内に含まれ、移動範囲が各軸に沿って±2cmを超えない範囲にあることが求められる(計画に複数のターゲットがある場合、全ターゲットは直径8cmの1個の球体に含まれること)。

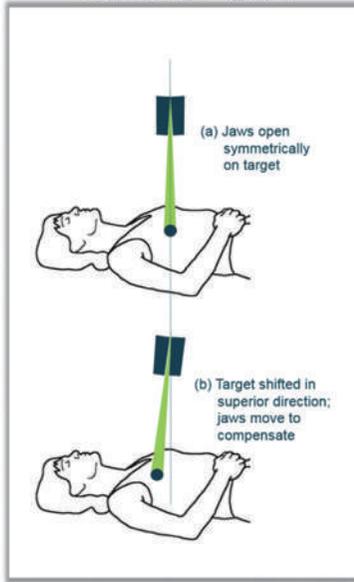
2020年8月末現在、本邦では3施設にてSynchronyを用いた実臨床が開始され、肺腫瘍のみならず、Synchronyとして世界初の試みとなった肝腫瘍治療も開始された。特に肺腫瘍に対してはマーカレス治療が可能な症例が少なからずあり、低侵襲的な追尾照射の実施が期待される。治療時間としても、入室から退室まで20分以内で運用された症例も経験されている。

肺腫瘍を標的としたマーカレス治療例を図4に示す。従来方法(ITVプラン法)と比較し、平均肺野線量を減少させることができた(図4右)。

4) Synchronyのアドバンテージ

ラディザクトシステムは、腫瘍周辺の正常組織を避けつつ、標的へ線量集中性の高い照射を行うこ

ダイナミックジョーが
S/I方向の動きを補正



バイナリーMLCが
A/P、L/R方向の動きを補正

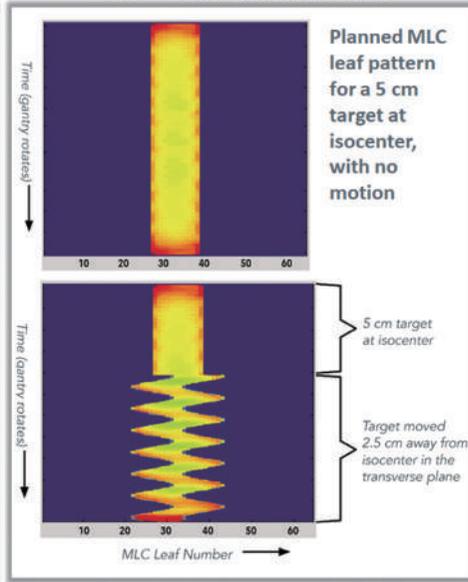


図3 ダイナミックジョー、バイナリーMLCによる補正機構

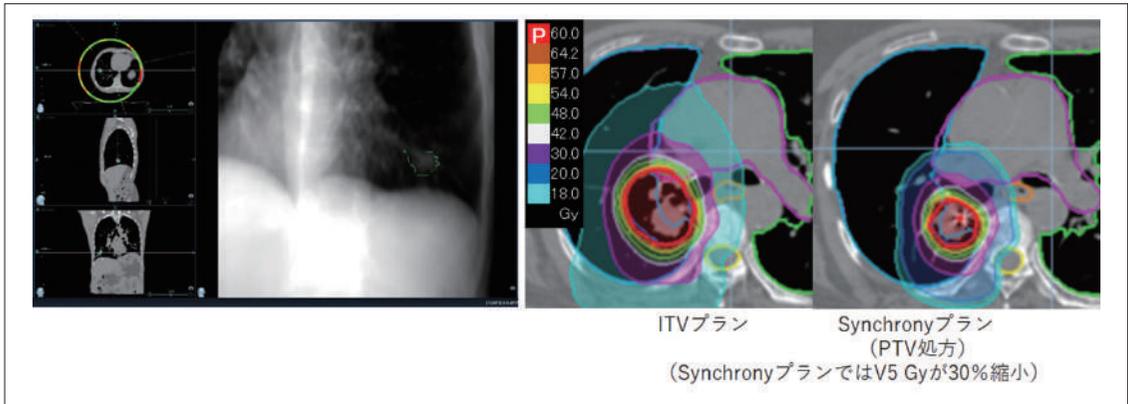


図4 肺腫瘍マーカレス治療例

左：腫瘍追尾機構 右：線量分布比較

とを意図して開発され、Helical照射による原体一
致性の高い照射などを得意としている。Synchrony
では、Helical照射による従来のきめ細やかな線量
分布を活かしつつ、サイバーナイフシステムで実証
された追尾技術を実装した。

呼吸位相に追従した標的位置相関モデルの継続
的な更新、治療時間延長のない追尾機構の具現化、
条件が揃えば肺腫瘍に対するマーカレス治療が可
能なことなど、Synchronyの提供する放射線治療
にはさまざまなアドバンテージが期待される。

より安全・安心な高精度放射線治療を達成する
手段の一つとして本機構が活用され、引き続き臨
床現場で医療従事者の方々をご支援できるよう、さ
らなる改善・開発を進めていく所存である。

サイバーナイフの最新機種
『CyberKnife S7シリーズ』について

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治療システムとして世界的に認知されている。日本では、2003年にサイバーナイフG3が販売開始して以来、線量率向上や、コリメータおよびトラッキング手法を拡充し、その技術を進化させてきた。

最新機種であるサイバーナイフS7シリーズは、治療計画システムにVOLO最適化計算アルゴリズムを搭載し、治療計画立案および治療時間を大幅に短縮した。従来から搭載されている技術も含め、サイバーナイフシステムの技術と臨床上のメリットを紹介する。

1) 自動位置照合によりサブミリメートルの照射精度を担保

サイバーナイフシステムは、独自のロボット機動性により、広い立体角からの照射(ノンコプラナー照射)を行い、複雑な腫瘍形状に合わせた照射と、周囲正常組織への照射を抑える急峻な線量勾配の実現が可能である。

サイバーナイフシステムでは、標的の動き(図5左:青丸)にあわせてロボットが自動的に照射位置を補正する(図5左:緑線)。一般的な画像誘導放射線治療システムでは、治療開始前の位置情報を

治療中に更新せず、照射補正を行わないため、標的と照射ビームの位置ずれ(図5右:青丸と赤線)を考慮し、正常組織への照射範囲拡大(マージン)が必要となる。

2) 動体追尾技術による自由呼吸下での治療

前述のラディザクトシステムに実装されたSynchrony®オプションは、サイバーナイフシステムに標準で実装されている機能である。自動的に呼吸追尾を行うため、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に、呼吸性移動を伴う腫瘍の治療を可能にする。患者は治療中も自然な呼吸を維持することができる。

ラディザクトシステムと同様、kV-X線画像(数秒毎に撮影)上の標的位置と患者体表面に装着したLED信号から算出される呼吸周期を相関させ、呼吸位相による標的位置相関モデルを作成し、この相関モデルから標的位置を予測する。予測された標的位置に合わせて照射ビームをロボットが自動的に補正し、呼吸性移動に準じた追尾照射を行う。腫瘍位置を適切に追尾するように、相関モデルは治療中、継続的に更新される。また、肺腫瘍自体を標的として認識できる場合は、マーカレス治療も可能である。ラディザクトのSynchrony®オプション

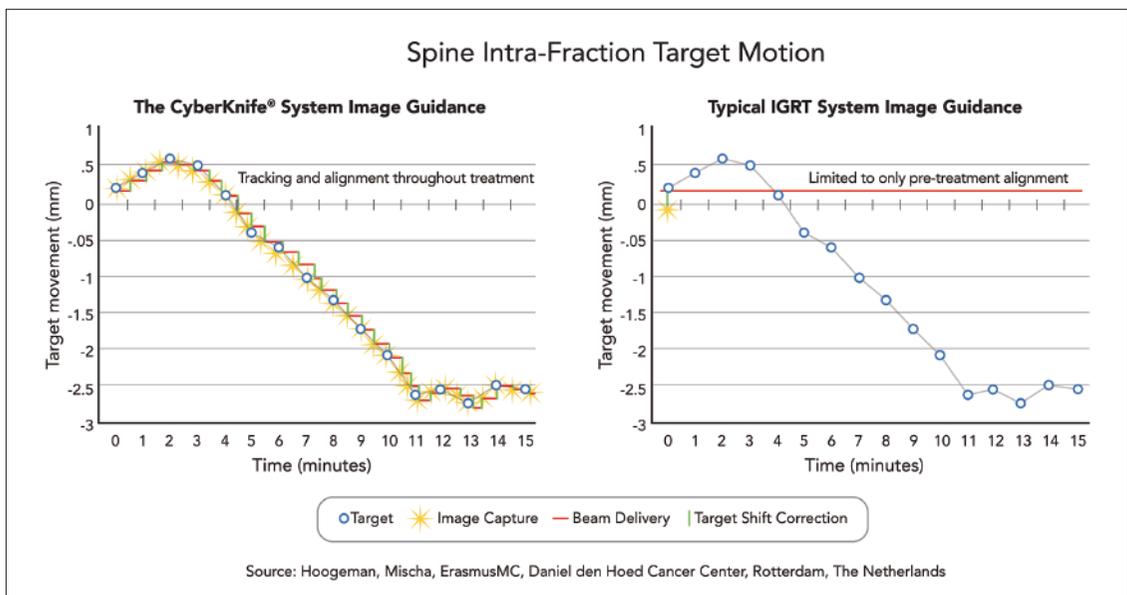


図5 標的の動きに対するビームの追従性比較

左: サイバーナイフシステム

右: 一般的な画像誘導放射線治療システム

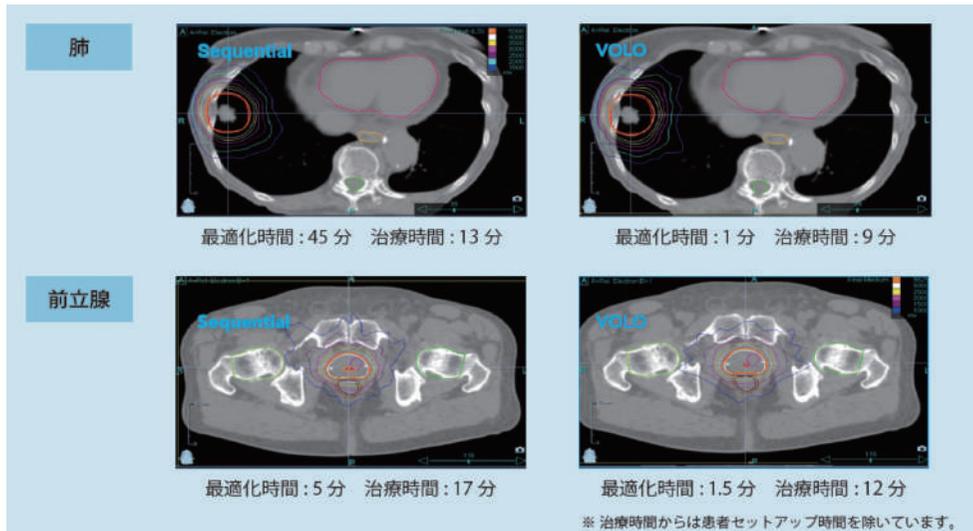


図6 従来のSequential最優化とVOLO最優化の速度比較

上段：肺症例 下段：前立腺症例
 左：Sequential最優化法 右：VOLO最優化法

と異なる点は、照射ビームを機動性の高いロボットが調整するため、補正の自由度がより高い点である。

3) 質の高さと治療時間短縮との両立を可能に

サイバーナイフS7シリーズは、VOLO™最優化アルゴリズムを追加搭載した治療計画システム Accuray Precision®を装備している。治療計画時間は従来のSequential最優化と比較して6~7割の大幅な時間削減を実現した。治療時間も、たとえば前立腺の標準的な寡分割照射時間(ビームオンからビームオフの時間)は15分以下になった(図6)。

4) 寡分割照射治療に適したサイバーナイフシステム

これまで紹介してきた技術(サブミリメートルの

照射精度、リアルタイム追尾技術、自由度の高いロボット照射)を実装したサイバーナイフシステムは、正常組織の照射線量を抑え、標的に高線量を集中させる寡分割照射に非常に適した進化を遂げてきた。

治療日数の少ない寡分割治療を得意とし、自由呼吸下での治療や特定条件下でのマーカレス治療の実現、再照射治療にも対応できるなど、患者や医療従事者の負担軽減と、安心安全を目指した放射線治療がサイバーナイフシステムによってますます具現化されつつある。根治治療のみならず、緩和治療にも高精度放射線治療が積極的に適応され、より個別化したがん治療をより多くの患者・医療従事者へ提供する時代に、サイバーナイフがさらに妥協のない寡分割照射を目指していく。

放射線治療の安全性について:

放射線療法(Accuray製品を通じて実施される放射線療法を含む)における副作用のほとんどは、軽度で一時的なものであり、その多くは疲労、悪心、皮膚刺激などです。しかしながら、重症な副作用を伴う場合もあり、疼痛や正常な身体機能の変化(例えば、泌尿器や唾液の機能の変化)、生活の質の悪化、永続的な損傷、さらに死亡につながる場合があります。副作用は、放射線治療中または治療直後に生じる可能性も、治療後、年月を経たから生じる場合もあります。副作用の性質や重症度は多くの要因に依存しており、治療対象である腫瘍の大きさや位置、治療手技(例えば照射線量)、患者の全身症状などに依存することが例として挙げられます。