

# 最新の放射線治療計画システム

(株)日立メディコ 治療システム技術部  
安達 裕樹



## 【はじめに】

X線外照射における放射線治療計画システムの技術動向について、ソフトウェアの最新機能を中心に紹介する。

放射線治療計画システムは、X線CT装置の普及にともない、X線フィルム等によって照射形状の計画を行なう2次元的なものから、CT画像を活用した3次元的な放射線治療計画へ移行および普及するとともに、1990年代後半の強度変調放射線治療IMRT技法の登場から、2000年代に入って画像誘導放射線治療IGRTのためのシステムや回転型IMRT(VMAT)など相次いだ放射線治療装置の技術革新に対応するかたちでソフトウェアを高機能化させてきた。

またこの間、形態画像であるCT画像に加え、MR画像や機能画像であるPET画像を、放射線治療の治療領域(ターゲット領域)の決定に利用するためのImage Fusionソフトウェアも放射線治療計画システムに搭載されてきた。さらに、代表的な臓器の輪郭抽出を簡便化するために、従来からのCT値閾値による輪郭取りと、あらかじめ登録しておいた臓器モデル形状を組み合わせた輪郭抽出や複数臓器の一括抽出機能など画像処理技術も融合して進化してきた。

放射線治療の高精度化の一方で、これまでも治療期間中の体型変化や腫瘍の縮小など時間的変化に対応するため、CT画像を再撮影した上で治療計画の修正(Re-Planning)を行うことで治療計画を個別に最適化することも行われている。さらに近年ではCT装置の呼吸同期撮影4D-CT画像や放射線治療装置のIGRTシステムにより得られる画像を利用することで、臓器の呼吸性移動や照射直前の臓器の形状変化および位置を把握することが可能になっており、放射線治療の数週間にわたる照射期間中の時間軸を考慮するという意味での4D治療計画の作成が可能になってきた。

治療照射中(Intra-fraction)や数週間にわたる一連の治療期間中(Inter-fraction)の線量を時間的に追跡し、累積結果を当初の計画線量と比較評価するだけでなく、意図した線量分布に向けて治療計画の修正や再最適化を行うAdaptive Planningの機能も求められている。

## 【最新機能紹介】

### 1. 4D治療計画へ

#### (1) Deformable registration

画像どうしを、平行移動と回転操作の線形移動によって重ね合わせて表示する従来からのImageFusionとは異なり、Deformable (Image) Registration機能は、一方の画像セットを基準となる画像セットに対して変形させてボクセル単位で合わせこむ画像処理技術である。

Deformable Registrationによってボクセル単位で算出される画像間の変位量に従って、治療計画の作成に用いたCT画像上に描いた臓器やターゲットの輪郭情報を、もう一方の画像へ変形して移し込むことや、逆に他の画像上で計算した線量分布結果を治療計画の作成に用いたCT画像に変形して移し込むことで、複数の画像セットにまたがる線量の時間的累積と治療計画時の線量の比較評価を行うことが可能になる。これは、4D治療計画やAdaptive Planningをより現実味のあるものにする

ために必要不可欠な核心技術である(図 1)。

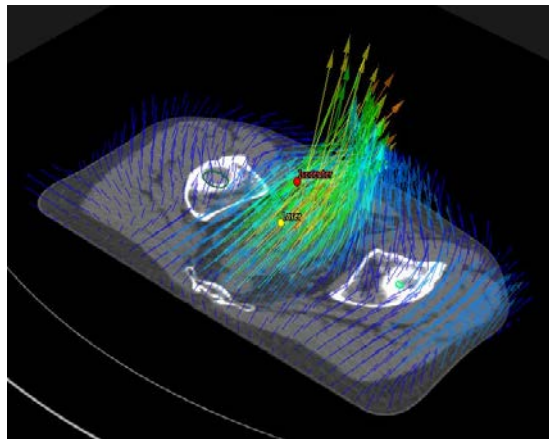


図 1 Deformable registration の変位量表示の例

## (2) 4 D Dose 評価

### ① 4 D-CT を利用した治療計画 (Intra-fraction)

線量を集中させたいターゲットや線量を低く抑えたい重要臓器の呼吸性移動を考慮した治療計画に 4 D-CT が利用されているが、基準位相画像に操作者が書き込んだターゲットや臓器の輪郭 ROI を、他の全ての位相画像にも同様にひとつひとつ書き込むことは手間と時間を要する作業となる。

そこで、Deformable Registration で得られる画像間のボクセル単位の変位量を利用して基準位相画像に書き込んだそれぞれの輪郭 ROI を、各位相画像に Propagate (伝播) することで輪郭 ROI の書き込みに要する作業時間の短縮が期待できる(図 2)。

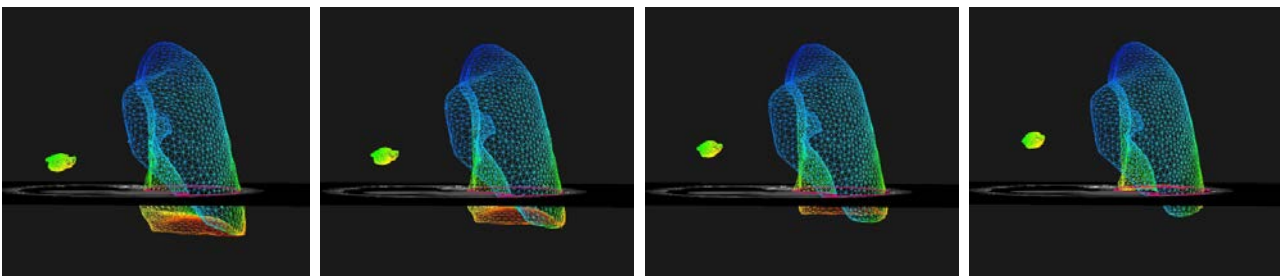


図 2 輪郭 ROI の Propagate の表示例

また基準位相画像で計画した放射線の照射方向や照射線量等のパラメータを、各位相画像にもコピーし線量計算することで得られた線量分布を、逆に Deformation と重み付けをした上で基準位相画像上に累積していくことで、呼吸周期を通した線量分布をシミュレーションすることができる。

### ② 日々の線量の累積評価 (Inter-fraction)

放射線治療装置の IGRT 機能搭載タイプでは、治療寝台上の患者の CBCT を治療照射直前に撮影でき、ターゲットや臓器の位置および形状の照射直前の状態を観察できる。

当社放射線治療計画システム RayStation では、CBCT 画像を線量計算に利用する機能も有し、実際の照射時点に近い位置や形状での線量分布をシミュレーションすることも可能である。また Deformable Registration と Dose Tracking 機能を用いて CBCT から得られた照射回ごとの線量分布を治療計画作成に用いた CT 画像上に変形して累積することで、治療開始当初の治療計画の DVH (線量と輪郭内体積の関係性を示す線グラフ) および線量分布と累積結果の線量分布との比較

評価が行え、Adaptive Planning が 必要か否かの判断に活用できる(図 3)。

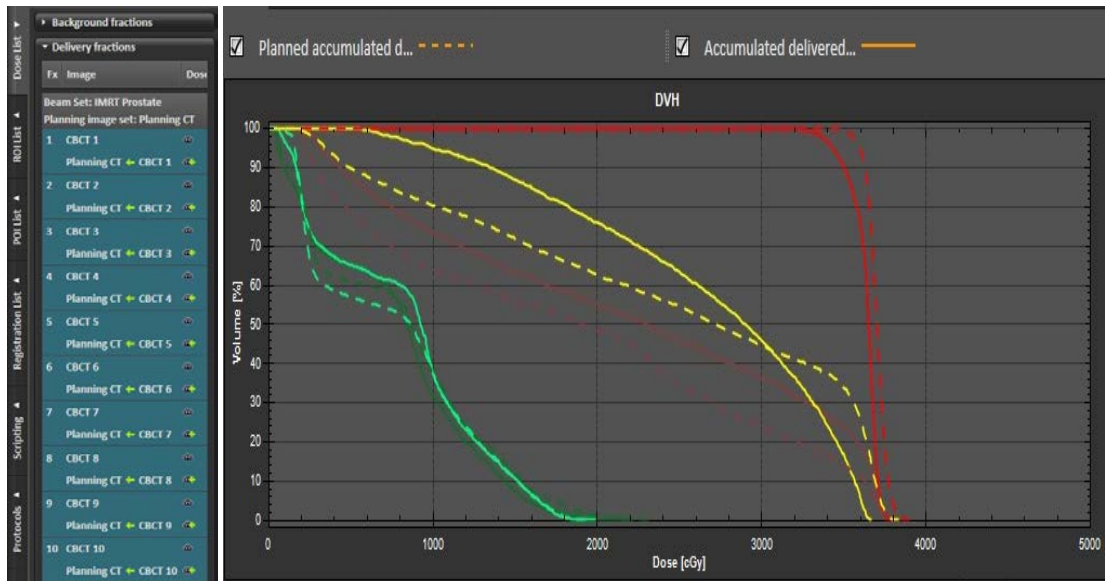


図 3 日々の線量の累積評価の DVH 表示例

### (3) Adaptive Planning

当社 RayStation に搭載の Adaptive Planning 機能は、Dose Tracking 機能による累積線量と当初の計画線量との比較評価の結果から、複雑な操作無しで Treatment Adaptation ツールに移行して治療計画の再最適化をスムーズに始めることができる機能である。

累積線量を新しい画像に Deformation して移し込み、バックグラウンド線量として考慮しながら現在の患者状態に適応するよう、新たに設定した線量目標に向けた治療計画の最適化が可能である。

この際に元のビーム条件や処方設定、線量目標値が自動的にコピーされ、必要に応じて諸条件の見直しから IMRT の再最適化演算までを行うことが可能になっている(図 4)。

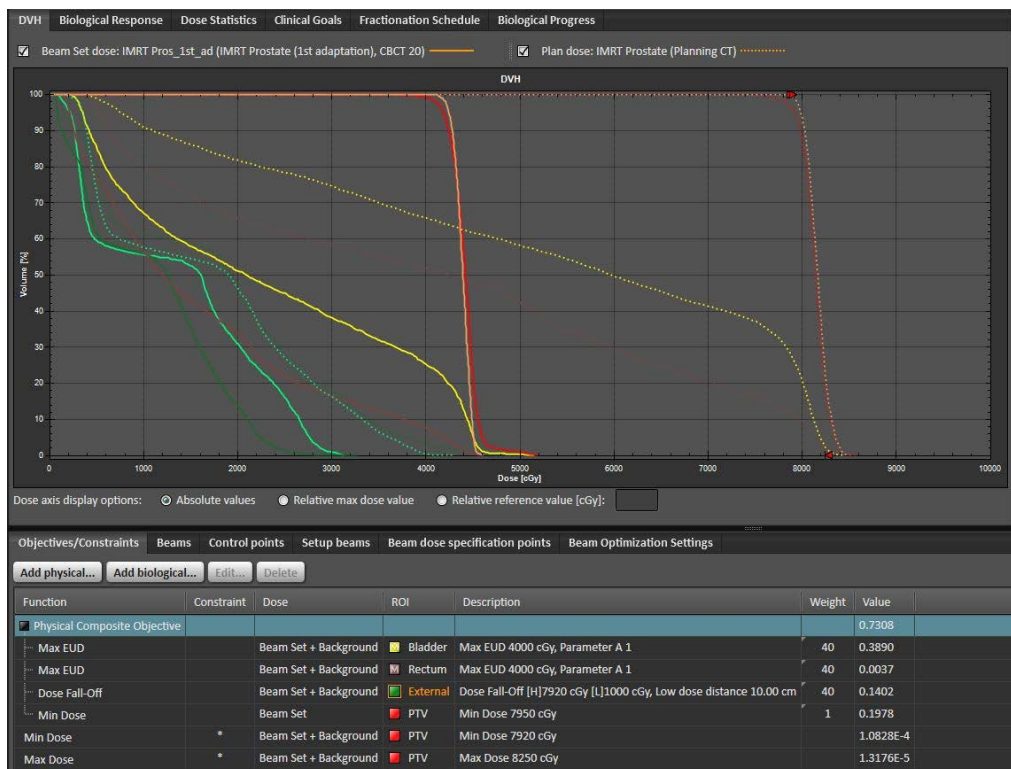


図 4 Adaptive Planning の最適化画面の表示例

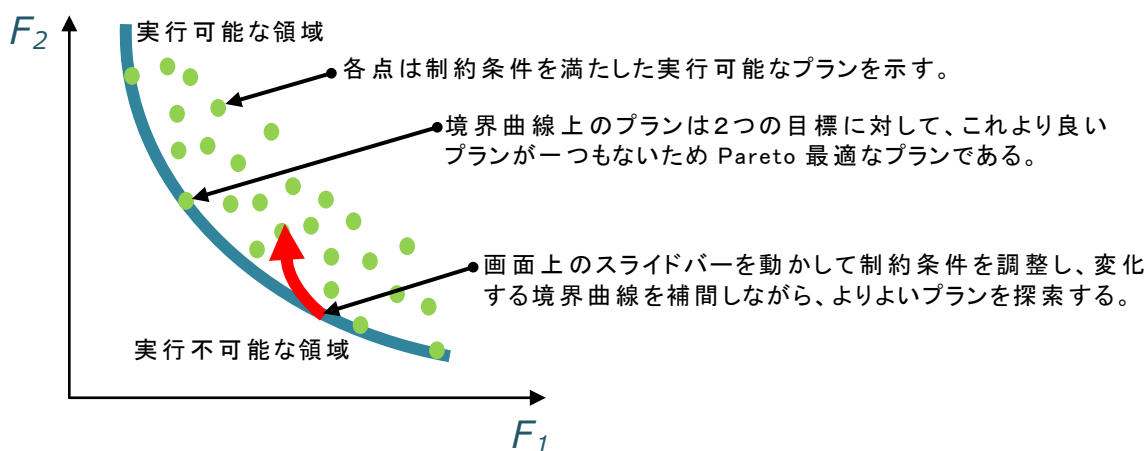
## 2. IMRT/VMAT 最適化演算エンジン：Multi Criteria Optimization

線量目標と制約条件に基づくIMRT/VMATのインバースプランニングにおいては、ターゲットへの線量カバーと周囲の重要臓器への線量回避という相反する目標や、複数種類の重要臓器が存在する場合には、臓器毎にそれぞれ線量制約が異なることから、目的関数どうしが互いにトレードオフの関係にあり、一般的にこのような問題に対する最適解は1つではない。

このような多目的最適化の問題を解くために、従来のIMRTプランニングでは、操作者が最適化演算が終了するたびに結果を線量分布図やDVHを用いて観察すると同時に、目的関数の達成具合を示す Objective Value の値を指標にして目的関数ごとに目標値や Weight 値の変更などの調整を行って最適化演算を試行錯誤的に繰り返し行うことが一般的な操作の流れであった。

操作者にとって時間を要するプランニングのプロセスを改善する方法として、当社RayStationに搭載の Multi Criteria Optimization エンジンでは、操作者が設定した線量目標・制約条件に従って自動生成される Pareto 最適な状態にある複数の代表的治療計画に基づき線量分布の最適化を行う。

ここで Pareto最適とは、他の目的関数を悪化させること無く、どの目的関数もこれ以上改善することができない状態を指し、同時に全ての目標を達成する完全最適解の存在しない多目的最適化の問題においては、このような状態にある解の1つ1つを最適解とみなす(図5)。この Pareto最適な状態にあるプランの集合の中から、よりよいプランをいかに操作者の選好基準を取り入れて提示することが出来るかがソフトウェア技術の腕の見せ所である。



$F_1$  : ターゲットへの線量カバーという目標の達成度合いを示す指標

$F_2$  : 重要臓器への線量回避という目標の達成度合いを示す指標

達成すべき目標 :  $F_1$  と  $F_2$  の線形加重和を最小にすること

図5 目的関数が2つの場合の Pareto最適の概念図

Multi Criteria Optimization エンジンでは操作者が目的関数毎に用意されたスライダーを用いて線量分布やDVHの変化をリアルタイムに観察して直観的に目的関数間のトレードオフバランスを選好することが出来る(図6)。

これによりこれまでの数値調整と最適化演算を繰り返すプロセスに比べ潜在的なトレードオフの最適バランスを短時間かつ比較的容易に見つけることが可能になる。

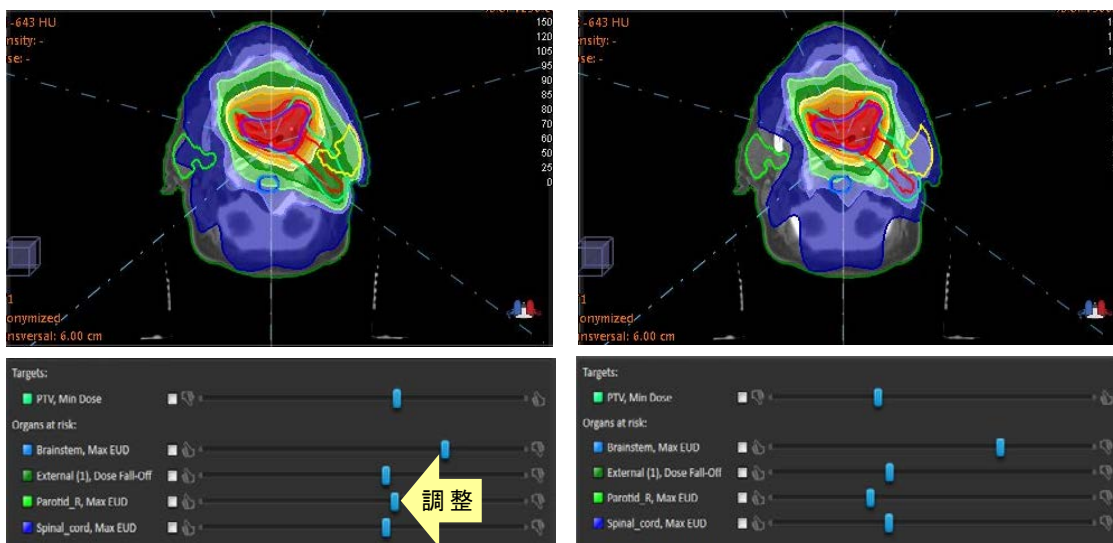


図 6 Multi Criteria Optimization のスライダーによる調整の例

### 【まとめ】

放射線治療計画の高精度化や 4 D 化の流れもともなって、治療計画において扱うデータ量と演算処理量が増え続けており、放射線治療計画システムの役割はますます重要になっている。

従来にも増して高度な治療計画がルーチンとして現場で求められてきており、操作者の負担を軽減し複雑なワークフローをスムーズに行える統合されたソフトウェア環境が必要不可欠になってきている。

ハードウェアのスペック向上とともに、ソフトウェア面では、ハードウェアのリソースを効率よく利用することができるようになってきており、マルチスレッディング対応はもとより、グラフィック処理に利用されている GPU の線量計算やインバースプランの最適化演算、Deformable Registration 処理への利用も実現され始めている。

### 【参考文献】

- 1) 中山弘隆, 谷野哲三:「多目的計画法の理論と応用」, 計測自動制御学会(1994)
- 2) 熊谷孝三:「放射線治療技術学」, 日本放射線技術学会(2006)