

重粒子線治療の全身被ばく線量評価システム RT-PHITS for CIRT の開発

古田 琢哉
Furuta Takuya

1. はじめに

放射線治療では、腫瘍に放射線のエネルギーである線量を集中させることにより、治療効果の最大化を狙いつつ、できるだけ周辺の正常組織への影響を軽減するように計画される。しかし、正常組織に当たる線量を完全に無くすことはできず、これが2次がん等の晩発の副作用の発生要因となり得る。重粒子線（炭素線）治療（Carbon Ion RadioTherapy: CIRT）においても、従来の放射線治療に比べて、より線量を腫瘍に集中できるものの、正常組織の副作用の発生リスクは無視できない。2次がん等の確率的に非常に低い割合で起きる晩発の副作用の原因を究明するには、腫瘍から離れた領域まで含めた患者全身の詳細な被ばく線量分布を基に、臓器ごとの被ばくがどの程度で、それにより副作用がどれくらい発生しているのかを膨大な数の患者に対して調べる必要がある。しかし、重粒子線治療では、X線治療に比べて2次がんの発生率が優位に低いとの報告¹⁾があるものの、統計的に十分な症例データに対して、治療部位から離れた正常組織への被ばく線量を調べるシステムがなく、定量的な評価がなされていない。

2. 従来の線量評価と本システムの開発の目的

重粒子線治療の治療計画時に実施する従来の線量評価では、治療効果と周辺重要臓器の急性障害の回避を目的に治療部位近傍に範囲を限定した評価が行われるため、2次発がん等の低確率の副作用に影響

する低線量の領域までの線量評価は行われない。そこで、重粒子線治療後の副作用の発生原因の調査に必要な詳細な被ばく線量データを取得するために、日本原子力研究開発機構（原子力機構）と量子科学技術研究開発機構（QST）では、治療部位から遠く離れた正常組織までを含む患者全身の線量評価を可能とするシステム RT-PHITS for CIRT を開発した²⁾。

3. RT-PHITS for CIRT

本システムは、QSTの保有する世界最多の症例数のブロードビーム法による重粒子線治療データを対象に、患者ごとの照射体系を再現する。この体系に対して、モンテカルロ放射線挙動解析コード PHITS³⁾によりシミュレーションを実施することで、正確な線量分布を評価する。PHITSには、放射線治療シミュレーションを支援する目的で、患者CT画像から患者全身体系を構築し、患者体内での放射線の挙動を解析するパッケージ（RadioTherapy package based on PHITS: RT-PHITS）が用意されている⁴⁾。これを拡張する形で新しいモジュールとして、重粒子ビームを患者ごとの腫瘍形状に合わせるために調整した照射装置（レンジシフタやコリメータ）の部品配置等の情報を重粒子線のDICOM規格の治療計画データ（RT-Plan）から抽出し、患者全身体系を含めた重粒子ビーム照射体系を再構築する機能を開発した。PHITSでは重粒子ビームと照射装置部品や体内の物質との衝突（核反応）をあらわに扱うことで、従来の線量評価では直接取り扱わない核反

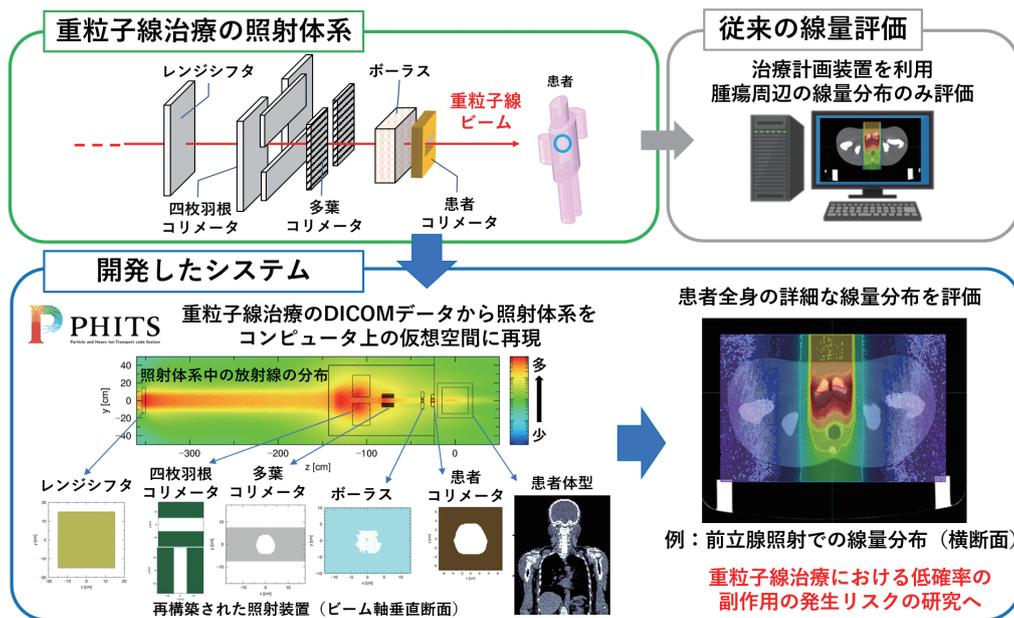


図1 開発した重粒子線治療時の患者全身の線量評価システム (RT-PHITS for CIRT) の概要

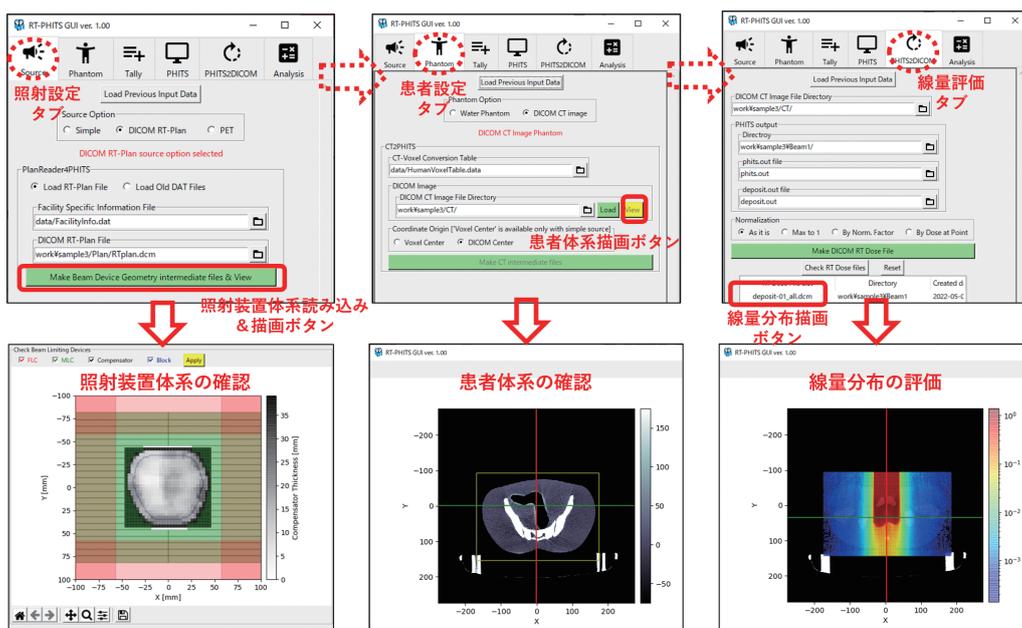


図2 RT-PHITS for CIRT のグラフィカルユーザーインターフェース

応由来の2次粒子の挙動を考慮する。治療部位から離れた低線量領域への寄与は中性子等の2次粒子が支配的であり、照射体系を再現したPHITSシミュレーションにより、治療部位から離れた正常組織まで含む広い領域の線量評価を可能にした。治療計画データを直接読み込み、線量分布を自動的に計算するシステムとすることで、疫学研究に必要とされる膨大な数の患者データを処理できる体制を整えた。図1に開発したRT-PHITS for CIRTの概要を示す。

本システムは、PHITSの計算結果の線量分布をDICOMデータ(RT-Dose形式)に変換する機能も有するので、一般の治療計画支援装置を用いて、患者CT画像に線量分布を重ねた描画や治療計画装置の線量分布との比較等の詳細解析が可能である。また、独自のグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)を開発し、直感的な操作による容易な設定や、視覚的な照射装置体系及び患者体系の確認、そして線量分布の評価を可能とした(図2)。

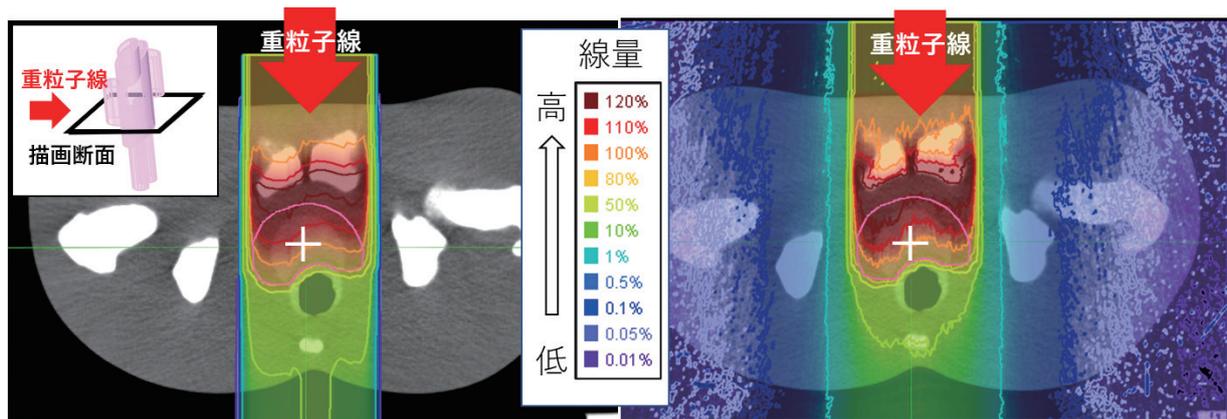


図3 従来の線量計算方法（左）と本システム（右）で評価した人体模擬ファントム内の線量分布の比較
+印がアイソセンタ（100%）を示す

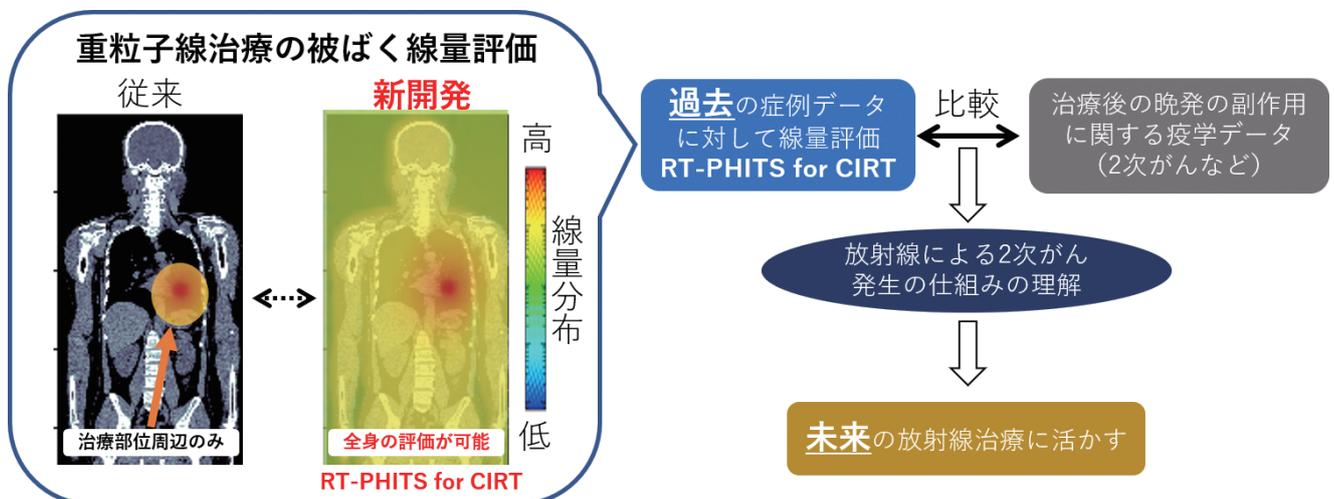


図4 開発した線量評価システム（RT-PHITS）の役割のイメージ図

4. 適用例

模擬的な治療計画として、重粒子ビームを人体模擬ファントムの前立腺に照射する症例を用意し、本システムを用いて線量分布を計算した（図3）。従来の線量計算（図3左）と本システム（図3右）の線量分布を比較した結果、アイソセンタ（照射中心）近傍では、従来の線量計算とPHITSで分布が良く一致するが、アイソセンタから離れた場所での分布では両者に違いが見られた。特にビームに垂直な方向の違いは大きく、本システムの結果ではアイソセンタから離れた領域でも低い線量値が示されるのに対し、従来の線量計算ではアイソセンタから離れた場所で急激に0になった。この違いの要因は本システムでは従来の線量計算で無視されていた2次粒子の挙動を物理的に正しく扱い、治療部位から離れた

領域に対しても正確に線量分布が計算できるためである。

5. 今後の予定

本システムを用いて、QSTの保有するブロードビーム法による重粒子線治療の症例を対象に、過去の治療計画に対する線量分布の再評価を実施する予定である。評価結果を治療後の2次がん発生等の疫学データと組み合わせることで、放射線治療後の副作用と被ばく線量の相関関係を明らかにすることができる。この症例データの再評価を通して重粒子線治療の2次がん発生率の低い理由や放射線治療における副作用の発生の仕組みの解明が期待できる。そして、現状の腫瘍周辺のみでの線量評価の治療計画を超えて、将来的な副作用の発生リスクの低減を考慮

した新たな放射線治療計画への発展が期待できる(図4)。

なお、本研究で開発した RT-PHITS for CIRT は最新版の PHITS 配布パッケージに内包され、公開されている。PHITS 配布パッケージはホームページ (<https://phits.jaea.go.jp>) から申請を行うことで、無償で入手可能である。

謝辞

本稿は、QST の古場裕介氏、米内俊祐氏、都立大学の Weishan Chang 氏、松本真之介氏、名古屋大

学の石川諒尚氏、原子力機構の橋本慎太郎氏、佐藤達彦氏との共同研究内容の解説です。共同研究者の協りに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) O. Mohamad, *et al.*, *Lancet Oncol.*, **20**, 674 (2019)
- 2) T. Furuta, *et al.*, *Phys. Med. Biol.*, **67**, 45002 (2022)
- 3) T. Sato, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 684 (2018)
- 4) T. Furuta, *et al.*, *Radiol. Phys. Technol.*, **14**, 25 (2021)

(日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 放射線挙動解析研究グループ)