

# 論 文 概 要

## ○ 論文題目

画像誘導放射線治療における照合画像取得線量と治療線量の  
包括的評価に関する研究

## ○ 指導教員

人間総合科学研究科生命システム医学専攻  
榮 武二 教授

## (所属)

筑波大学大学院人間総合科学研究科生命システム医学専攻

## (氏名)

富田 哲也

## 【目的】

近年、画像誘導放射線治療 (image guided radiation therapy: IGRT) が広く普及し、高精度治療に多用されている。放射線により照合画像を取得する IGRT は被ばくを伴い、IGRT の一種である cone-beam computed tomography (CBCT) を毎回の治療の際に撮影すると患者の被ばく線量が 1 Gy を超える場合もある。しかし、臨床で使用されている放射線治療計画装置では照合画像取得に伴う線量 (imaging dose) を計算できず、治療線量との包括的な評価に至っていない。本研究では、CBCT 施行時の imaging dose を高精度に計算して、治療線量と合算できるシステムを構築し、合算した線量分布を用いて治療計画を包括的に評価することを目的とした。

## 【対象と方法】

筑波大学附属病院で前立腺がんに対して強度変調放射線治療 (intensity modulated radiation therapy: IMRT) を施行した患者 20 例、上咽頭がんに対して IMRT を施行した患者 8 例を対象とした。各患者の治療計画用 computed tomography (CT) 画像を用いて、Monte Carlo (MC) シミュレーションにより 39 回治療した際の骨盤部 CBCT (前立腺がん) および頭頸部 CBCT (上咽頭がん) の imaging dose を計算した。CBCT の撮影 mode は half-fan mode と full-fan mode とした。治療線量と臓器の輪郭は、Pinnacle<sup>3</sup> v9.10 (Philips Medical Systems, Fitchburg, WI, USA) もしくは RayStation v6.2 (RaySearch Laboratories, Stockholm, Sweden) で立案したものを利用し、線量の合算と dose volume histogram の解析は MATLAB r2018b (The MathWorks Inc., MA, USA) の自作プログラムで行った。ターゲットの線量は  $D_2$  ( $D_x$ とは体積の  $x\%$ に投与される線量のこと)、 $D_{98}$  および均一性の指標である homogeneity index (HI) を評価し、リスク臓器 (organ at risk: OAR) の線量は  $D_2$ 、 $D_{50}$  を評価した。前立腺 IMRT においては、直腸の  $V_{75}$  ( $V_y$ とは  $y$  Gy 以上が投与される体積のこと)、 $V_{70}$ 、 $V_{65}$ 、 $V_{60}$  および膀胱の  $V_{80}$ 、 $V_{75}$ 、 $V_{70}$ 、 $V_{40}$  を評価した。さらに、Lyman-Kutcher-Burman モデルを用いて骨盤部臓器と頭頸部臓器の正常組織障害発生確

率 (normal tissue complication probability: NTCP), Schneider のモデルを用いて骨盤部の二次発がんリスクを評価した。

## 【結 果】

39 回治療を実施した際の骨盤部 CBCT dose は, half-fan mode の  $D_{50}$  の平均が前立腺, 直腸, 膀胱いずれも 1 Gy 弱であったが, 骨盤骨は  $1.76 \pm 0.27$  Gy と高かった。Full-fan mode では線量が低減する傾向であったが, 直腸については 25.0%増加した。頭頸部 CBCT dose は, 骨盤部の CBCT dose と比べて半分から 1/10 程度であり,  $D_{50}$  の平均は, 左右の水晶体が約 2 cGy, それ以外は約 10-20 cGy, 最大でも右耳下腺の  $19.69 \pm 1.13$  cGy であった。ターゲットの線量は, 骨盤部 CBCT において  $D_2$  が half-fan mode で 0.90 Gy 増加し, full-fan mode で 0.76 Gy 増加した。頭頸部 CBCT においてはターゲットの  $D_2$  が約 0.2 Gy 増加した。HI は骨盤部, 頭頸部ともに変化を認めなかった。骨盤部における OAR の線量は, Radiation Therapy Oncology Group 0415 の線量指標で評価した。直腸は, 撮影 mode に関わらず  $V_{75}$  が約 0.1%,  $V_{70}$ ,  $V_{65}$ ,  $V_{60}$  が約 0.3%増加した。膀胱は, full-fan mode で  $V_{80}$ ,  $V_{75}$ ,  $V_{40}$  が約 0.4%,  $V_{70}$  が 0.3%増加し, half-fan mode で  $V_{80}$ ,  $V_{75}$  が約 0.6%,  $V_{70}$  が 0.4%,  $V_{40}$  が 0.8%増加した。頭頸部における OAR の線量は  $D_2$ ,  $D_{50}$  を評価し, 全ての OAR で 0.1-0.2 Gy 増加した。治療線量に CBCT dose を追加すると, 直腸の NTCP は, 撮影 mode に関わらず 0.46%から 0.53%に増加した。膀胱の NTCP は, CBCT dose を追加しても最大 0.02%であった。頭頸部においては, CBCT dose の追加によって脊椎の NTCP が 0.89%から 0.91%に, 右耳下腺の NTCP が 40.07%から 40.88%に増加した。二次発がんリスクは, CBCT dose の追加によって膀胱が 0.26%から 0.27%に, 骨盤骨が 0.09%から 0.11%に増加した。

## 【考 察】

本研究で構築した CBCT のシミュレーション体系を用いて, 楕円形ファントム内の

実測値と MC 計算値を比較すると、絶対値で最大 0.23 cGy の差であり、先行研究と比較して同等以上の精度が担保されていることが確認できた。したがって、本システムにより高精度に CBCT dose を評価できると考える。従来考慮されていなかった imaging dose について、米国医学物理学会（American Association of Physicists in Medicine）が刊行した Task Group 180 report では、処方線量の 5%を超える場合には治療線量に含めることを推奨している。しかし、その方法は明記されておらず、imaging dose の取得も容易ではない。本研究において、骨盤部は前立腺、直腸、膀胱、および骨盤骨の線量を、頭頸部は脳幹、脊髄、左右耳下腺、および左右水晶体の線量を詳細に示した。患者の体形、撮影条件や固定具の使用状況などで多少誤差は生じるものの、治療計画の際に参考値として利用できると考える。本邦においては、診療用放射線に係る安全管理体制の構築の一環として、撮影線量に関する管理・記録が求められているが、IGRT における撮影線量に関する線量管理・線量記録の指針は構築されていない。本研究で構築したシステムは CBCT dose と治療線量を合算して包括的に評価することが可能であり、線量管理・線量記録の一手法になり得るものと考ええる。

さらに本研究では、構築したシステムを用いて CBCT dose を含めた治療計画の包括的評価を線量分布と障害発生リスクから行った。線量分布は CBCT dose によって均一性が乱されることなく、撮影範囲全体の線量が増加し、骨盤部 CBCT（39 回分）では最大 1.3 Gy、頭頸部 CBCT（39 回分）では最大 0.6 Gy 増加した。骨近傍では軟部組織の 3 倍程度の線量になるため、骨近傍に OAR がある場合には慎重な評価を要する。しかし、CBCT dose による二次発がんリスクなどの障害発生確率の上昇はわずかであり、CBCT を控える理由にはなり得ないと考える。むしろ、IGRT がもたらす位置照合精度の向上によって、照射範囲を最小限に抑えることが可能となり、障害発生割合が低減することの方が重要である。当然ながら、無用な被ばくは最低限に抑えるべきであり、被ばくを伴わない表面モニタや超音波モニタの併用、撮影条件の調整や full-fan mode の活用など

の考え得る被ばく低減対策は施すべきである。

#### 【結 論】

本研究では、MC 計算によって CBCT dose を高精度に取得し、治療線量と合算して包括的に評価できるシステムを構築した。さらに、構築したシステムを用いて、これまでに提案されていない CBCT dose と治療線量の合算線量を評価する手法を確立した。本研究から、治療回数分(39 回分)の CBCT dose を合算しても前立腺 IMRT と頭頸部 IMRT の治療計画に大きな乖離を生じないことが明らかになった。