

氏名（本籍）	富田 哲也（茨城県）
学位の種類	博士（医学）
学位記番号	博甲第 9658 号
学位授与年月	令和2年 8 月 31 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	人間総合科学研究科
学位論文題目	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
主査	筑波大学教授 博士（医学） 櫻井 英幸
副査	筑波大学准教授 博士（医学） 増本 智彦
副査	筑波大学准教授 博士（医学） 熊田 博明
副査	筑波大学助教 博士（医学） 加藤 広介

論文の内容の要旨

富田哲也氏の博士学位論文は、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の確立を目的としたものである。

その要旨は以下の通りである。

（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。放射線治療は、設定された照射条件（照射範囲、ビーム入射方向、X 線エネルギーなど）に基づいて高精度な線量計算が行われ、線量分布図や着目臓器の線量体積ヒストグラム（dose volume histogram: DVH）などにより、治療開始前に綿密な評価が行われている。しかし、臨床で使用されている放射線治療計画装置（radiation treatment planning system: RTPS）では照合画像取得に伴う線量（撮影線量）を計算できず、治療線量との包括的な評価は実現していない。

そこで著者は、CBCT 施行時の撮影線量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て研究を行った。

（方法）

著者は大きく分けて 3 つの検討を行っている。

(1) 治療線量と撮影線量の包括的線量評価システムの構築

現在、CBCTの撮影線量を計算できるRTPSまたは治療計画支援装置は存在しない。そのため、モンテカルロ (Monte Carlo: MC) シミュレーションによるCBCTの線量計算を実現している。さらに、治療線量との包括的な線量評価を考慮して、治療計画に用いたCT画像と臓器輪郭を利用できるシステムを構築している。著者が構築したシステムの計算精度を、放射線計測器による実測値とシミュレーションによる計算値から比較評価している。

(2) CBCTの撮影線量と治療線量を合算した線量分布の評価

著者は構築した包括的線量評価システムを用いて、骨盤部と頭頸部におけるCBCTの撮影線量を計算している。さらに、前立腺強度変調放射線治療 (intensity modulated radiation therapy: IMRT) 20例と頭頸部IMRT8例を対象に、治療線量と合算を行い、線量分布とリスク臓器 (organ at risk: OAR) の線量を評価している。

(3) 合算線量による障害発生リスクの評価

本研究で構築されたシステムは、治療計画に用いた臓器輪郭を利用しており、DVHを取得することが可能である。著者は、CBCTの撮影による被ばく線量の増加を評価するだけでなく、DVHを利用して二次発がんを含む障害発生リスクを評価している。

(結果)

(1) 包括的線量評価システムの計算精度

著者は、構築した包括的線量評価システムの計算精度について、水中の線量プロファイルでは実測値とシミュレーション値との差異は、深部量百分率 (percentage depth dose: PDD) が最大4.0%、軸外線量比 (off center ratio: OCR) が最大12.0%であることを示している。また、楕円形水等価固体ファントム内の実測値とシミュレーション値との差異は、骨盤撮影が7.2% (絶対線量差0.04 cGy) 以内、頭頸部撮影が12% (絶対線量差0.02 cGy) 以内であることを示している。

(2) CBCTの撮影線量と治療線量を合算した線量分布の評価

著者は、骨盤部における39回分のCBCTの撮影線量について、前立腺、直腸、膀胱、骨盤骨の D_{50} がそれぞれ80.3 cGy, 84.0 cGy, 88.1 cGy, 176.2 cGy、頭頸部については、脳幹、脊髄、右耳下腺、左耳下腺の D_{50} がそれぞれ7.6 cGy, 10.9 cGy, 19.7 cGy, 14.9 cGyであると示している。治療線量と合算した線量分布とDVHなどの評価を実現し、CBCTの撮影線量を考慮しても大きな変化は生じないことを示している。

(3) 合算線量による障害発生リスクの評価

著者は、前立腺IMRTにおいてOARとなる直腸は、CBCTの撮影線量を考慮すると正常組織障害発生確率 (normal tissue complication probability: NTCP) が0.46%から0.53%に0.07%上昇することを示している。また、頭頸部IMRTにおいてOARとなる脊髄と耳下腺は、NTCPがそれぞれ0.89%から0.91%に0.02%上昇、40.07%から40.88%に0.81%上昇することを示している。

(考察)

kV-X線によるCBCTの線量は、骨近傍で急激に線量が増加することが知られている。そのため、骨近傍にOARが存在する場合には慎重な評価が必要となるが、計算精度と臓器線量の評価を満足するシステムは存在しない。本研究では、MCシミュレーションを用いて、高精度な線量計算を実現し、治療計画に用いる臓器輪郭を活用することで臓器線量の評価も実現している。臓器線量の評価は、DVHの取得を可

能にし、二次発がんを含む障害発生リスクの評価につながる。著者は、MC シミュレーションを用いることが、線量計算精度の観点からも障害発生予測の観点からも有用であるとしている。

従来考慮されていなかった位置照合画像の撮影線量について、米国医学物理学会が刊行した 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て評価することを推奨している。しかし、その方法は示されておらず、撮影線量の取得は容易ではない。著者は、本研究で構築した包括的線量評価システムが治療線量と CBCT の撮影線量を合算した線量で評価可能なことを明らかにし、これまでに提案されていない新たな線量評価法を確立したと結論付けている。

審査の結果の要旨

(批評)

画像誘導放射線治療において、位置照合画像を取得するために生じる線量と治療線量を包括的に評価することは重要である。本研究では、kV-X 線による cone-beam CT の撮影線量を CT 画像から高精度に計算し、治療計画に用いた臓器輪郭を活用することで臓器線量と二次発がんを含む障害発生リスクを包括的に評価した。治療線量と CBCT の撮影線量を合算して包括的に評価できる新たなシステムを構築した点で、極めて臨床的意義が高い。

令和 2 年 6 月 30 日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもと論文について説明を求め、関連事項について質疑応答を行い、最終試験を行った。その結果、審査委員全員が合格と判定した。よって、著者は博士（医学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認める。