

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24689048

研究課題名(和文)放射線治療装置を使ったハイブリット及びデュアルエネルギーCTシステムの開発

研究課題名(英文)Development of Hybrid and Dual Energy CT System in Radiation Therapy Device

## 研究代表者

芳賀 昭弘 (Haga, Akihiro)

東京大学・医学部附属病院・助教

研究者番号：30448021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,600,000円

研究成果の概要(和文)：診断用利用されるキロボルト(kV)エックス線と放射線治療用利用されるメガボルト(MV)エックス線の両投影像を使った新規CT再構成アルゴリズムを開発した。散乱補正を含む逐次近似再構成法・周期的又は非周期的な臓器運動・制限された照射形状に対応した技術開発による画質改善とkVとMV間の大きなエネルギー差を利用したデュアルエネルギー再構成法を実現したことで、本研究が放射線治療における臓器位置検証システム及び線量計算システムの進歩に大きく貢献するものと考えている。

研究成果の概要(英文)：I have developed a novel reconstruction algorithm for computed tomography using kV and MV X-rays, which are commonly used in the diagnostic and treatment beams, respectively. This study has improved the image quality by considering scattering X-ray, periodic and non-periodic anatomy motions, and restricted field imaging for treatment, as well as the dual energy CT reconstruction, and thus, contributes to the development of both systems of target verification and dose calculation.

研究分野：医学物理学、放射線物理学

キーワード：Dual energy CT Cone beam CT kilo voltage X-ray Mega voltage X-ray in-treatment CT Four dimensional CT

## 様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在の高精度放射線治療を支える技術の柱として、以下の3つを挙げることができる：

1. 投与線量分布の高精度化
2. 治療前に実施する線量検証
3. 治療患者(の臓器)位置の再現性

理想的な線量分布を実現するため、逆計算により放射線の空間的な線量強度分布を求めて放射線量を変調する手法(強度変調放射線治療、Intensity Modulated Radiation Therapy; IMRT)が確立し、最近では放射線射出部分(ガントリ)を連続的に回転させながら強度変調放射線治療をおこなう VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy) が開発されている。IMRT や VMAT に代表される投与線量分布の高精度化は、正常組織の線量を減らしながらかん病巣への大線量の投与を可能にする一方、その事実は照射量や位置の精度が悪いと致命的な結果を引き起こしかねない。そのため、シミュレーション上の線量分布が現実に再現されているかどうかを確認することは、重要な臨床作業の1つである。最近の放射線治療装置リアックには、治療用 MV 放射線の直交軸方向に診断用 kV エックス線装置が搭載されており、治療毎に診断用 kV エックス線による CT を撮影し、治療計画時の患者の臓器位置を再現してから治療を行なう手法が取られている。

このような事前線量検証と治療直前の患者位置照合は、重要である。しかし、それにも増して、現実の線量の投与量を正しく定量することは、真の線量検証と管理という観点だけではなく、放射線治療効果の正当な査定を導くという観点からも極めて重要である。申請者はこれまでの研究で、高精度放射線治療を支える4つ目の柱として、治療中の臓器位置の確認と線量分布再構成の技術の確立を掲げてきた。その中で、VMAT の特徴の1つである回転照射を利用し、VMAT 治療中に診断用 kV エックス線による kV-コーンビーム CT (CBCT) 画像を取得する方を提案、その kV-CBCT で装置制御系のエラーを含む線量分布を再構成する手法を発表した。その手法の有効性を示した一方で、それには治療中の kV エックス線の使用による被曝量の増加を伴う問題点があった。これは VMAT 治療ビームを使った CBCT (VMAT-CBCT) によって解決できるが、VMAT-CBCT では照射量の多い領域のみが再構成されるため、線量計算の利用には不向きである。加えて、VMAT-CBCT 再構成では、撮影時間中の臓器の運動、再構成領域外を通るエックス線による不正確な再構成画像、治療ビームの強度や形状が変調するために放射線治療制御装置とエックス線検出器の同期など、実用化に向けて解決すべき課題が沢山残されていた。kV-CBCT を線量計算に応用することについても、散乱線の影響による画質の劣化の改善が必要と考えられた。

### 2. 研究の目的

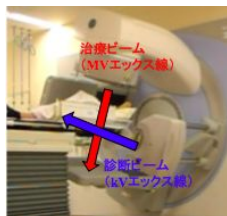


図1. 診断用 kV エックス線が備わった放射線治療装置の例 (Elekta 社)

このような背景のもと、本研究では、kV-CBCT 再構成アルゴリズムの改良と

MV エックス線投影像による臓器位置検証システムを構築することを目的とした。図1には、治療用 MV エックス線とともに診断用 kV エックス線発生装置が備わった

放射線治療装置の例が示されている。商用化されている診断用 kV-CBCT 再構成アルゴリズムには Filtered back projection (FBP) アルゴリズムを採用されている。本研究では逐次近似アルゴリズムを採用し、散乱線や臓器の動きを考慮した新手法を提案・実現すること、また治療ビームの MV エックス線投影像を用いた再構成手法を提案し、臓器位置の検証の実現可能性を議論することを目的とした。また、kV エックス線投影に対し、MV エックス線投影の同期システムを構築する事で、余分な線量を加えることなく治療中の患者臓器位置の検証が可能なる事、また kV と MV のエックス線の減弱の違いを反映した CT 画像の取得が可能となる事から、kV-MV デュアルエナジーCBCT 再構成手法の開発を目指した。デュアルエナジーCBCT では、kV-CBCT で見られる金属アーチファクトを低減できるだけでなく、有効原子番号の情報を持つ画像の取得ができ、電子密度のみを反映した標準的な線量計算の精度を劇的に進展させると期待された。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、以下の5項目に沿って研究を推進した。

(1) 逐次近似再構成を用いた散乱線による kV CBCT 画質劣化の改善

本研究項目では、東京大学医学部附属病院放射線治療部門放射線治療装置 (Elekta 社) に併設された kV CBCT システムを使用した。自作した鉛のビームストッパー (コリメータ) を利用し散乱成分の実測と、Klein-Nishina の散乱公式に基づく解析的な散乱シミュレーションを相補的に組み合わせ、被写体の形状や減衰係数を考慮した簡便かつ高精度な散乱分布の推定を行った。

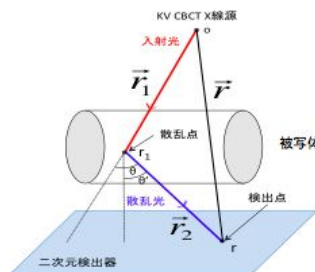


図2. Cone beam撮影におけるX線源、被写体(ファントム)、二次元検出器、入射光、散乱光、の幾何学的関係

図2には Cone beam 撮影における幾何を示す。二次元検出器における検出点  $r$  では、kV-CBCT エックス線源から直接入射する光子と散乱点  $r_1$  で散乱された光子が観測される。本研究では、コリメータによって直接入射光子が遮へいされる領域の光子強度を計測し、Klein-Nishina の散乱公式で計算される光子強度を正規化した。散乱は被写体の線減弱係数に依存するため、正規化は逐次再構成アルゴリズムの中に組み込んで実施された。

(2) 新規4次元 kV CBCT アルゴリズムの開発と線量計算への応用

放射線治療装置に備えられている kV CBCT システムは、ガントリ回転速度の制約がある(1回転/min以下)。このため、ガントリ回転中の臓器運動は、ガントリ回転中の平均画像として可視化される。この臓器運動の平均化は、ボケ画像を生じるため、放射線治療におけるセットアップで kV CBCT を利用する場合には、標的やリスク臓器の同定において精度を低下させる恐れがある。本研究では、呼吸のような周期的な運動と直腸ガスの移動のよ

うな非周期的な運動に対する kV CBCT 画像の 4 次元化アルゴリズムを考案した。前者に対しては、撮影された kV エックス線投影像間の正規化相互相関による呼吸信号の取得 (図 3) と呼吸位相を分類するアルゴリズムを提案した。

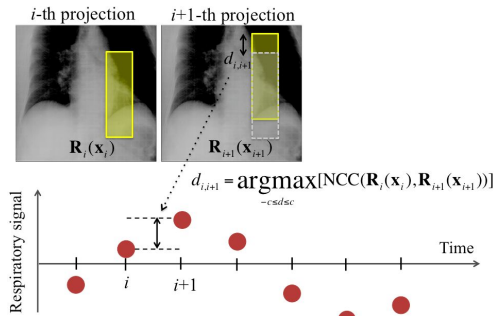


図 3 . 本研究で提案する呼吸信号の取得方法

後者に対しては、再構成に使用する投影像の取得範囲を分割・移動し、それぞれ再構成を独立に実施する方法を新たに提案した (図 4)。

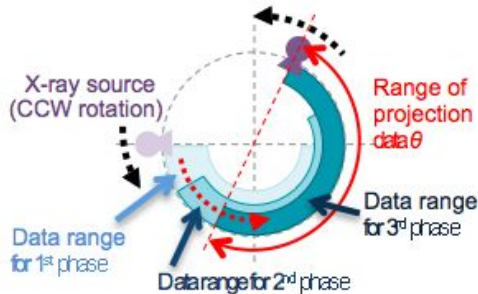


図 4 . 本研究で提案する非周期型 4 次元 CBCT アルゴリズム

本研究期間では、周期型 4D CBCT に対して線量計算を実施し、非剛体レジストレーションを用いた線量合算によって実際に投与された線量評価システムの検証を行った。

### (3) MV エックス線投影像の同期システムの開発

本研究で使用した放射線治療装置には治療用 MV エックス線とともに、その直角方向に診断用 kV エックス線装置が設置されている (図 1)。診断用 kV エックス線による CBCT 撮影を取得する為に、リニアック制御装置と kV 用フラットパネル検出器とが同期することで、CBCT 再構成に必要なガントリ角や回転軸ずれ補正值 (フレックスマップ) を取得している。他方、MV 用フラットパネル検出器は CBCT 撮影が想定されていないため、ガントリ角、ビーム強度、照射サイズ、フレックスマップなどを独自に構築する必要があった。本研究では、放射線治療装置に重力センサー (Mathresolutions 社) を備え付けることでガントリ角を直接取得し、MV 用フラットパネル検出器で取得したデータにそれを時刻同期させるシステムを構築した。このシステムを用いて、MV 治療ビームの回転軸ずれ補正に関する経時的な変化の観測を行った。

### (4) MV エックス線投影像による再構成方法の提案

上記同期システムにより、ガントリ回転角と MV エックス線投影像を結びつけることが出来たことで、両者の

情報を使った MV CBCT の再構成に着手した。まず、照射野サイズが 40cm x 10cm の開口コーンビームによる再構成方法を構築した。本研究では、MV 投影像の前処理としてノイズ除去と強度補正及びフレックスマップによる回転軸ずれ補正を行った。治療ビームの投影像を用いた再構成では、コリメータにより遮へいされた領域を再構成から除去する Masking 補正、再構成される被写体の各ボクセルを通過する光子数に応じた強度補正を行う Ray-passing 補正を行った。この補正方法の概略を図 5 及び図 6 に示す。

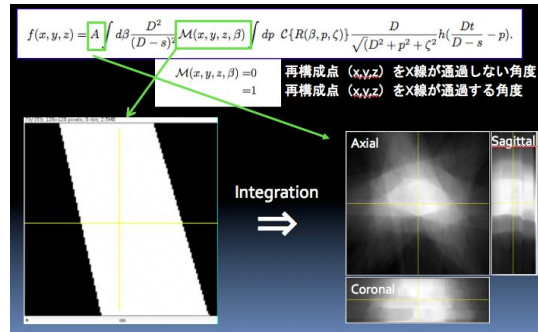


図 5. Masking 補正の概説図 : FBP アルゴリズムにおける投影の u 成分である p に関する積分において、閾値を設定する。

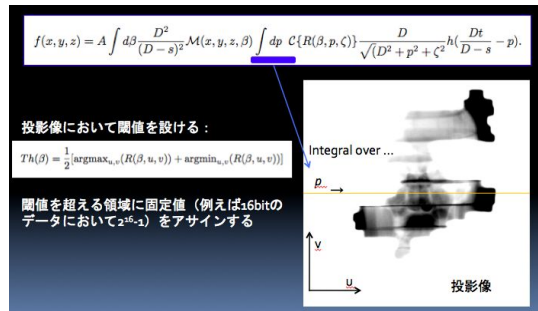


図 6. Ray-passing 補正の概説図 : 再構成点によって X 線が通過する光子の数が異なるため、各ボクセルで計算される通過光子数で規格化する。

また本研究ではこの補正方法を、ヘリカル型放射線治療装置である Tomotherapy (Accuray 社) に応用し、治療部位の可視化について検討した。

### (5) デュアルエネルギー CT 再構成の実現と精度検証

上記までは kV エックス線と MV エックス線に対する再構成システムとアルゴリズムの構築を行ってきた。図 1 に示される通り、両エックス線は同時に使用することが原理的に可能であり、エックス線エネルギーをハイブリッドした CT 再構成の実現が期待できる。本研究では、kV CBCT と MV CBCT の両画像を用いて、Image domain におけるデュアルエネルギー再構成アルゴリズムによって有効原子番号の推定を行った。kV CBCT と MV CBCT の CT 値のキャリブレーションにはモンテカルロ計算によって得られたそれぞれのエネルギースペクトルから決定した線減弱係数と CIRS 社製ファントムの公称値を採用し、kV CBCT と MV CBCT のそれぞれの線減弱係数の比に対する有効原子番号の対応テーブルを作成した。このテーブルを用いて、The Phantom Laboratory 社製 CatPhan ファントムのコンポーネントに対する推定された有効原子番号の比較を行った。解析の流れに関する概略を図 7 に示す。



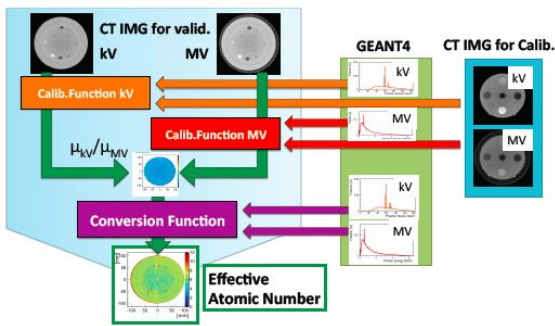


図 7. kV CBCT と MV CBCT を用いた有効原子番号推定に関する流れの概略

#### 4. 研究成果

上記研究を遂行する事により、以下の成果を得ることができた。

(1) 逐次近似再構成を用いた散乱線による kV CBCT 画質劣化の改善

図 8 にコリメータ開口幅を変えたときの最尤推定逐次近似アルゴリズムによって再構成された水ファントムの減弱係数値を示す。開口幅 0mm の結果は、kV エックス線の実効エネルギーに対する減弱係数の理論値であり、コリメータ幅を大きくすることで、再構成される線減弱係数の値が小さく見積もられてしまうことが分かる。コリメータ開口幅が最大である 28cm の場合において、散乱光子の影響を Klein-Nishina の公式から除去したときの結果が緑の四角で表示されている。散乱光子の影響を取り除くことによって、線減弱係数の値が上昇し、7cm のコリメータ開口幅よりも大きい値を得る事ができた。また、散乱補正の計算は、逐次近似のアルゴリズムにおいて 2 回程度考慮する事で十分収束していることが確認された。以上、本方法によって、精度の高い線減弱係数を得るための CBCT 再構成アルゴリズムを実現することができた。

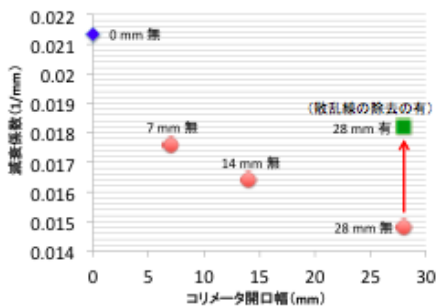


図 8. 再構成された水ファントムの減弱係数値のコリメータ開口幅の依存性

(2) 新規 4 次元 kV CBCT アルゴリズムの開発と線量計算への応用

図 9 は呼吸性移動に対する再構成された 4 次元 kV CBCT 画像を示している。ここで、呼吸信号は 10 位相に分類され、対応する投影画像のみを使って各位相毎に再構成されている。黄色のラインで囲まれている領域の中に腫瘍が存在しており、その位置が位相に応じて移動していることがわかる。

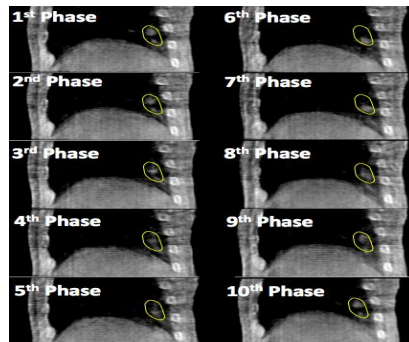


図 9. 呼吸性運動に対する 4 次元化された kV CBCT (Sagittal view)

図 10 には、非周期的な運動に対する例として骨盤領域の 4 次元 kV CBCT 画像を示した。こちらもガス形状の経時的な変化を見事に可視化できていることがわかる。

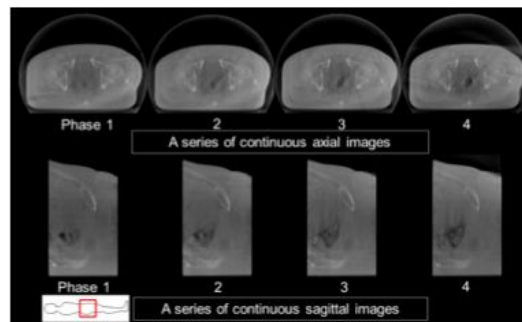


図 10. 非周期的運動に対する 4 次元化された kV CBCT (上段は Axial view、下段は Sagittal view)

以上の通り、本研究により周期的・非周期的運動に対する 4 次元 CBCT 再構成を実現することができた。

(3) MV エックス線投影像の同期システムの開発

ガントリ角センサーと MV エックス線投影像の同期を行うことによって、ガントリ角と投影像の対応が可能となった。図 11 は放射線射出口の対向に設置されたフラットパネル検出器により観測されるデータの回転軸ずれ補正値を示している。このデータは 2012 年から 2013 年の長期間に渡って繰り返し取得されたデータであり、東京大学医学部附属病院における放射線治療の品質管理プログラムの 1 つとして有効に利用されている。

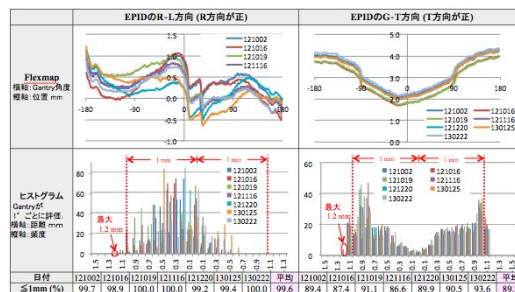


図 11. 治療用 MV エックス線に対するフレクスマップ (上段は縦方向と横方向のガントリ角毎のフラットパネル中心のずれ、下段はその頻度を示す)

(4) MV エックス線投影像による再構成方法の提案

MV エックス線投影像とガントリ角の同期を実現したことによって、MV CBCT 再構成システムの構築が可能と

なった。kV CBCTと同じプロセスを採用することにより、図 12 に示すような画像を取得することが出来た。

また治療用にコリメートされたビームの投影像を用いて再構成を行った結果が図 13 に示されている。図 13 の右側が MV CBCT であり、kV CBCT 内にそれらが埋め込まれた図が左側の図である。このように、治療用ビームを用いることで、治療部位の 3 次元的可視化が可能であることがわかる。図 14 は Tomotherapy における治療データを用いたときの再構成の結果が示されている。Tomotherapy においても、可視化が可能であった事がわかる。このように、治療部位の可視化は、実際の治療の精度を検証する上で非常に有用であり、本手法が普及されることに対する期待は高い。

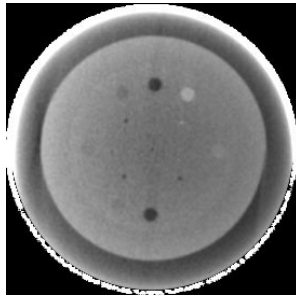


図 12. CatPhan ファントムの MV CBCT 画像(照射野サイズ 40cm x 10cm)

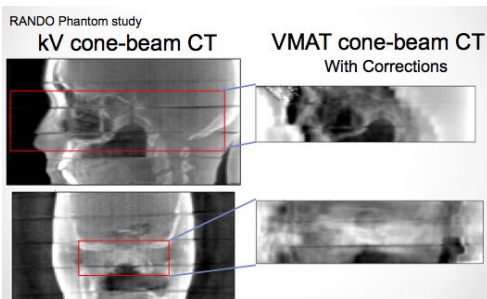
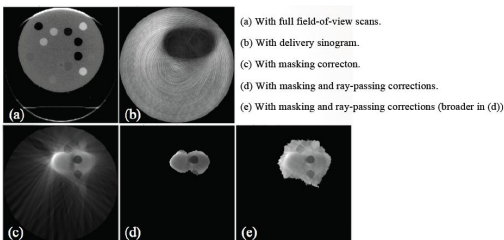


図 13. Rando ファントムに対する治療用ビームを用いた MV CBCT 画像(右)と kV CBCT (左: 対応部は MV CBCT の結果が埋め込まれている)

図 14. Tomotherapy に対する治療データを用いた再構成



結果

#### (5) デュアルエネルギー CT 再構成の実現と精度検証

図 15 は本研究で得られた ChatPhan ファントムに対する有効原子番号の推定結果である。赤い領域は有効原子番号が高い領域、青い領域は有効原子番号が低い領域を示す。CatPhan ファントムを構成する 7 つの物質のうち LDPE を除く 6 の物質において、経験的な有効原子番号算定に対して 2%未満の精度で再構成することが可能であった。逐次近似再構成のループ内に元素を推定するアルゴリズムを追加することによって、より精度が高められるのではないかと考えている。LDPE に対しては 7%程度の誤差が残っているが、上述のアルゴリズムとともに、有効原子番号算定方法の改善によって解決されるものと期待している。

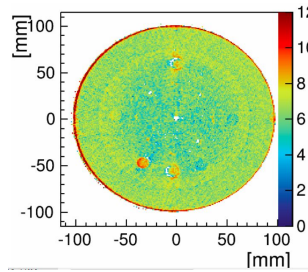


図 15. 本手法により推定された CatPhan ファントムの有効原子番号分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 19 件)

- 4D registration and 4D verification of lung tumor position for stereotactic volumetric modulated arc therapy using respiratory-correlated cone-beam CT  
Keiichi Nakagawa, Akihiro Haga, Satoshi Kida, Yoshitaka Masutani, Hideomi Yamashita, Wataru Takahashi, Akira Sakumi, Naoya Saotome, Takashi Shiraki, Kuni Ohtomo, Yoshio Iwai and Kiyoshi Yoda, Journal of Radiation Research, 52, 2012, 152-156.
- In-treatment 4D cone-beam CT with image-based respiratory phase recognition  
Satoshi Kida, Yoshitaka Masutani, Hideomi Yamashita, Toshikazu Imae, Taeko Matsuura, Naoya Saotome, Kuni Ohtomo, Keiichi Nakagawa, Akihiro Haga (Corresponding Author)  
Radiological Physics and Technology, 5, 2012, 138-147.
- Four-dimensional measurement of the displacement of internal fiducial and skin markers during 320-multislice computed tomography scanning of breast cancer  
Hideomi Yamashita, Kae Ohkuma, Keiichiro Tada, Kenshiro Shiraishi, Wataru Takahashi, Shino Shibata, Akira Sakumi, Naoya Saotome, Akihiro Haga, Tsuyoshi Onoe, Kenji Ino, Masaaki Akahane, Kuni Ohtomo, Keiichi Nakagawa, International Journal of Radiation Oncology, Biology, 84, 2012, 331-335.
- Evaluation of heterogeneity dose distributions for Stereotactic Radiotherapy (SRT) : Comparison of commercially available Monte Carlo dose calculation with other algorithms  
Wataru Takahashi, Hideomi Yamashita, Naoya Saotome, Yoshio Iwai, Akira Sakumi, Akihiro Haga and Keiichi Nakagawa, Radiation Oncology 2012, 7:20.
- Four-dimensional measurement of the displacement of metal clips or postoperative surgical staples during 320-multislice computed tomography scanning of gastric cancer  
Hideomi Yamashita, Kae Ohkuma, Wataru Takahashi, Akira Sakumi, Akihiro Haga, Kenji Ino, Masaaki Akahane, Kuni Ohtomo, Keiichi Nakagawa, Radiation Oncology 2012, 7:137.
- Comparison of total MU and segment areas in VMAT and step-and-shoot IMRT plans Motohiro Kawashima, Shuichi Ozawa, Akihiro Haga, Akira Sakumi, Chie Kurokawa, Satoru Sugimoto, Kumiko Karasawa, Keiichi Nakagawa, Keisuke Sasai, Radiological Physics and Technology, 6, 2013, 14-20.
- 肺定位放射線治療における標的の移動量の評価  
今江 裕一、芳賀 昭弘、木田 智士、早乙女 直也、白木 尚、矢野 敬一、中川 恵一、篠原 広行, Medical Imaging Technology, 30, 2012, 262-267.
- 4D digitally reconstructed radiography for verifying a lung tumor position during volumetric modulated arc therapy  
Keiichi Nakagawa, Satoshi Kida, Akihiro Haga, Yoshitaka Masutani, Hideomi Yamashita, Tsuyoshi Onoe, Toshikazu Imae, Kenichiro Tanaka, Kuni Ohtomo and Kiyoshi Yoda, Journal of Radiation Research, 53, 2012, 628-632.
- Impact of flattening-filter-free techniques on delivery time for lung stereotactic volumetric modulated arc therapy and image quality of concurrent kilovoltage cone-beam computed tomography: a preliminary phantom study  
Keishi Nakagawa, Akihiro Haga, Akira Sakumi, Hideomi Yamashita, Hiroshi Igaki, Takashi Shiraki, Kuni Ohtomo, Yoshio Iwai, and Kiyoshi Yoda, Journal of Radiation Research, 54, 2013, 1-3.
- Verification of Planning Target Volume Settings in Volumetric Modulated Arc Therapy for Stereotactic Body Radiation Therapy by Using In-Treatment 4-Dimensional Cone Beam Computed Tomography  
Wataru Takahashi, Hideomi Yamashita, Satoshi Kida, Yoshitaka Masutani, Akira Sakumi, Kuni Ohtomo, Keishi Nakagawa and Akihiro Haga (Corresponding Author), International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics, 86, 2013, 426-431.
- Dose Verification of Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) by use of In-treatment Linac Parameters  
Akihiro Haga, Akira Sakumi, Yukari Okano, Saori Itoh, Naoya Saotome, Satoshi Kida, Hiroshi Igaki, Kenshiro Shiraishi, Hideomi Yamashita, Kuni Ohtomo, and Keiichi Nakagawa, Radiological Physics and Technology, 6, 2013, 335-342.
- 回転照射法を用いた Winston-Lutz テストおよび幾何学的補正データの取得  
今江 裕一、芳賀 昭弘、早乙女 直也、竹中 重治、岡野 由香里、佐々木 克剛、根津 誠、三枝 茂輝、白木 尚、矢野 敬一、中川 恵一、大友 邦  
日本放射線技術学会雑誌, 70, 2014, 359-368.
- Independent Absorbed Dose Calculation Using the Monte Carlo Algorithm in Volumetric Modulated Arc Therapy  
Akihiro Haga, Taiki Magome, Shigeharu, Takenaka, Toshikazu Imae, Akira Sakumi, Akihiro Nomoto, Hiroshi Igaki, Kenshiro Shiraishi, Hideomi Yamashita, Kuni Ohtomo, and Keiichi Nakagawa  
Radiation Oncology, 9:75, 2014, 1-9.
- Multidisciplinary medical care in radiation oncology  
Igaki, H., Shiraki, T., Yamagami, M., Haga, A., Nakagawa, K. Japanese Journal of Cancer and Chemotherapy, vol. 40, no. 4, pp. 440-443, 2013.
- Validation of Planning Target Volume Margins by Analyzing Intrafractional Localization Errors for 14 Prostate Cancer Patients Based on Three-Dimensional Cross-Correlation between the Prostate Images of Planning CT and Intrafraction Cross-Beam CT during Volumetric Modulated Arc Therapy  
Kenshiro Shiraishi, Masahiko Futaguchi, Akihiro Haga, Akira Sakumi, Katsutake Sasaki, Kentaro Yamamoto, Hiroshi Igaki, Kuni Ohtomo, Kiyoshi Yoda, and Keiichi Nakagawa, BioMed Research International, Volume 2014, Article ID 960928, 5 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2014/960928
- Stereotactic Body Radiotherapy for Small Lung Tumors in the University of

Tokyo Hospital,  
Hideomi Yamashita, Wataru Takahashi, Akihiro Haga, Satoshi Kida, Naoya Saotome, and Keiichi Nakagawa  
BioMed Research International, Volume 2014, Article ID 136513, 13 pages,  
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/136513>  
18. Analysis of motion of the rectum and bladder during preoperative intensity modulated radiation therapy for rectal cancer using cone-beam computed tomography  
Hideomi Yamashita, Ryousuke Takenaka, Akira Sakumi, Akihiro Haga, Kuni Otomo and Keiichi Nakagawa  
Radiation Oncology, to be published (Accepted).  
19 Reconstruction of the treatment area by use of sinogram in helical tomotherapy  
Akihiro Haga, Keiichi Nakagawa, Calvin Maurer, Ken Ruchala, Edward Chao, Dylan Casey, Satoshi Kida, Dousatsu Sakata, Masahiro Nakano, Taiki Magome and Yoshitaka Masutani  
Radiation Oncology, to be published (Accepted).

## 〔学会発表〕(計 36 件)

1. Verification of MLC Position Using Electric Portal Imaging Device During VMAT Delivery  
Masatoshi Hashimoto, Akihiro Haga, R. Takahashi, M. Nakajima, *et al.*,  
International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics, 84, Supplement, 2012, S768-S769.
2. IN-TREATMENT DOSE CALCULATION USING INTREATMENT 4D KILOVOLTAGE CONE-BEAM CT AND IN-TREATMENT LINAC PARAMETERS DURING VOLUMETRIC MODULATED ARC THERAPY FOR A LUNG TUMOR  
Akira Sakumi, Akihiro Haga, Satoshi, Kida, Naoya, Saotome Kiyoshi Yoda, Keiichi Nakagawa, Radiotherapy and Oncology, 102, 2012, S125
3. IMPACT OF EMBEDDED SEEDS ON DOSE DISTRIBUTIONS IN X-RAY RADIOTHERAPY: A PHANTOM STUDY WITH MONTE CARLO CALCULATION.  
Kenshiro Shiraishi, Akira Sakumi, Akihiro Haga, Tsuyoshi Onoe, Kentaro Yamamoto, Kae Okuma, Kiyoshi Yoda, Keiichi Nakagawa, *Radiotherapy and Oncology*, 103, 2012, S68-S69.
4. DOSE COMPARISON BETWEEN DIFFERENT RESPIRATORY PHASES DURING LUNG VMAT DELIVERY USING IN-TREATMENT 4D CONE-BEAM CT.  
Naoya Saotome, Akira Sakumi, Satohi Kida, Tsuyoshi Onoe, Akihiro Haga, Yoshitaka Masutani, Kuni Ohtomo, Hideomi Yamashita, Keiichi Nakagawa, *Radiotherapy and Oncology*, 103, 2012, S188-S189.
5. A COMPARISON OF THREE REGISTRATION METHODS USING 4D PLANNING CT AND ON-BOARD 4D CONE-BEAM CT FOR LUNG VMAT  
Keiichi Nakagawa, Yoshitaka Masutani, Akihiro Haga, Hideomi Yamashita, Wataru Takahashi, Akira Sakumi, Satoshi Kida, Naoya Saotome, Kuni Ohtomo, Kiyoshi Yoda, *Radiotherapy and Oncology*, 103, 2012, S556.
6. INTERCOMPARISON OF IMPACT OF CONTINUOUSLY VARIABLE DOSE RATE ON THREE TREATMENT PLANNING SYSTEMS FOR ELEKTA VMAT  
Akira Sakumi, Akihiro Haga, Kenshiro Shiraishi, Tsuyoshi Onoe, Kentaro Yamamoto, Akihiro Nomoto, Yoshio Iwai, Kiyoshi Yoda, Kuni Ohtomo, Keiichi Nakagawa, *Radiotherapy and Oncology*, 103, 2012, S588.
7. Energy Spectrum Inference of X Rays from a Linac  
J Kotoku, T Kobayashi, N Arai, T Hatakeyama, S Kumagai and A Haga, *Med. Phys.* 39, 2012, 3715.
8. Geometric Agreement Check for Imaging System with Radiation Beam by KV and MV CBCT  
N Saotome, S Kida, A Haga, Y Masutani, K Ohtomo and K Nakagawa, *Med. Phys.* 39, 2012, 3659.
9. Lung SBRT using VMAT and in-treatment KV & MV cone beam CT imaging  
Akihiro Haga  
Symposium for Stereotactic Body Radiation Therapy (SBRT) for Liver, Lung & Spine Tumour, HOTEL HYATT REGENCY, Bhikaji Cama Place, New Delhi, Jan. 2012.
10. Four Dimensional Cone-Beam CT and VMAT  
Akihiro Haga  
Second International Conference on Real-time Tumor-tracking Radiation Therapy with 4D Molecular Imaging Technique, Kyoto, Feb. 2012.
11. Dose Distribution Generated from <sup>131</sup>I Radionuclide Using SPECT CT  
S Itoh, A Haga, Y Fukuda, N Sasano, T Onoe, S Shibata and K Nakagawa, *Med. Phys.* 39, 2012, 3694.
12. Determination of PTV Margin for Lung Tumor Using In Treatment 4D CBCT  
A Haga, K Nakagawa, H Yamashita, W Takahashi, A Sakumi, Y Masutani, S Kida, N Saotome, S Itoh, T Shiraki and K Ohtomo, *Med. Phys.* 39, 2012, 3699.
13. Accuracy Verification of 4D Cone Beam CT (CBCT)-Based Lung Tumor Registration by Way of In-Treatment 4D CBCT Analysis  
K. Nakagawa, A Haga, W. Takahashi, H. Yamashita, *et al.*, *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* 87, 2013, S752.
14. Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) in the Treatment of Localized Prostate Cancer: Initial Experience in 200 Patients  
K. Shiraishi, K. Yamamoto, A Haga, A. Sakumi, *et al.*, *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* 87, 2013, S752.
15. What Respiratory-Phase CT Is Optimal in Treatment Planning of Lung Cancer?  
A Haga, S. Saegusa, J. Kotoku, H. Yamashita, *et al.*, *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* 87, 2013, S531.
16. Improvement of Four Dimensional Cone Beam CT Image Quality with Iterative Reconstruction  
S Kida, M Nakano, Y Masutani, K Nakagawa and A Haga, *Med. Phys.* 40, 2013, 128.
17. Energy Spectrum Inference of Clinical Photon Beam by Use of PDD  
J Kotoku, A Haga, S Kumagai, N Saotome and T Kobayashi, *Med. Phys.* 40, 2013, 396.
18. Time Ordered Four Dimensional Cone Beam CT  
M Nakano, S Kida, Y Masutani, T Shiraki, K Shiraishi, K Yamamoto, K Nakagawa and A Haga, *Med. Phys.* 40, 2013, 178.
19. Registration Accuracy with Four Dimensional Cone Beam CT for Lung Cancer Treatment  
A Haga, J Kotoku, S Kida, Y Masutani, H Yamashita, W Takahashi, T Imae and K Nakagawa, *Med. Phys.* 40, 2013, 92.
20. The Performance Test of EPID for In Vivo Dosimetry  
N Saotome, S Kida, T Imae, K Sasaki, A Sakumi, Y Masutani, A Haga and K

- NakaGawa, *Med. Phys.* 40, 2013, 202.  
3-60 Calculation of Dose Distributions From 106 Ruthenium COC Type Eye Applicator  
M Futaguchi, A Haga, A Sakumi, H Okamoto, M Hamada, M Fuse, Y Abe, N Murakami, J Itami and K Nakagawa, *Med. Phys.* 40, 2013, 282.  
21. A study for the implementation of dynamic tracking radiotherapy system based on time series image prediction method  
Ritu Bhusal Chhatkuli, Kazuyuki Demachi, Akihiro Haga, Hiroshi Sakakibara, Kazuma Kamiaka, Yusuke Nakamura and Mitsuru Uesaka  
International Conference on Medical Physics (ICMP 2013), Brighton UK, September 2013.  
22. Evaluation of an intrafraction 4D cone-beam CT (CBCT) imaging system using a 4D lung tumor phantom driven by measured tumor motions for a lung cancer patient  
A. Sakumi, K. Mizuno, Y. Nishijima, M. Uesaka, A Haga, Y. Iwai, K. Yoda, K. Nakagawa  
International Conference on Medical Physics (ICMP 2013), Brighton UK, September 2013.  
23. Independent dose calculation with X-ray voxel Monte Carlo algorithm in volumetric modulated arc therapy  
A Haga, S. Takenaka, T. Imae, A. Sakumi, K. Ohtomo, K. Nakagawa  
*2nd ESTRO Forum (19-23 April 2013, Geneva, Switzerland)*  
24. Accuracy comparison of 3D and 4D CBCT based lung tumor registrations by way in-treatment 4D CBCT analysis  
K. Nakagawa, A Haga, W. Takahashi, H. Yamashita, T. Imae, S. Kida, Y. Masutani, A. Sakumi, K. Ohtomo, *2nd ESTRO Forum (19-23 April 2013, Geneva, Switzerland)*  
25. Verification System for Image-Guided Radiation Therapy by Using In-Treatment 4D CBCT  
W. Takahashi, A Haga, N. Yamamoto, H. Yamashita, T. Imae, S. Kida, A. Sakumi, K. Ohtomo, T. Kamada, K. Nakagawa, *2nd ESTRO Forum (19-23 April 2013, Geneva, Switzerland)*  
26. LUNG DEFORMATION SIMULATION BASED ON MEDICAL IMAGES AND MOTION MODELS OF DIAPHRAGM AND RIBS USING THE MPS METHOD  
Takayuki Okura, Kazuya Shibata, Seiichi Koshizuka, Akihiro Nomoto, Akihiro Haga and Keiichi Nakagawa, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2014.  
27. Delivered 4D Dose Calculation for Lung-VMAT Patients Using In-Treatment CBCT and LINAC Log Data  
N Saotome, A Haga, T Imae, S Kida, M Nakano, H Yamashita, K Nakagawa, K Ohtomo, *Med. Phys.* 41, 2014, 98.  
28. Estimation of Effective Charge Distribution by Dual-Energy CT Reconstruction  
D Sakata, S Kida, M Nakano, Y Masutani, K Nakagawa, A Haga, *Med. Phys.* 41, 2014, 153.  
29. Dose Distribution Using Respiratory Signals and Machine Parameters During Treatment  
T Imae, A Haga, N Saotome, S Kida, M Nakano, Y Takeuchi, T Shiraki, K Yano, H Yamashita, K Nakagawa, K Ohtomo, *Med. Phys.* 41, 2014, 248.  
30. 3D Surface Reconstruction of a Patient Using Epipolar Geometry  
J Kotoku, S Nakabayashi, A Haga, S Kumagai, T Ishibashi, N Arai, N Saotome, T Kobayashi, *Med. Phys.* 41, 2014, 185.  
31. Improvement of Time-Ordered Four Dimensional Cone-Beam CT; Image Mosaicing with Real and Virtual Projections  
M Nakano, S Kida, Y Masutani, T Shiraki, K Yamamoto, K Shiraishi, K Nakagawa, A Haga, *Med. Phys.* 41, 2014, 195.  
32. Reconstruction of the Treatment Area by Use of Sinogram in Helical Tomotherapy  
A Haga, K Nakagawa, C Maurer, K Ruchala, E Chao, D Casey, S Kida, D Sakata, T Magome, M Nakano, Y Masutani, *Med. Phys.* 41, 2014, 203.  
33. Four-Dimensional Dose Distribution Measurement Using Plastic Scintillator  
M Hashimoto, T Nishio, A Haga, T Hanada, S Kabuki, T Kozuka, M Oguchi, *Med. Phys.* 41, 2014, 382.  
34. Comparison of Survival-Time Prediction Models After Radiotherapy for High-Grade Glioma Patients Based On Clinical and DVH Features  
T Magome, A Haga, H Igaki, N Sekiya, Y Masutani, A Sakumi, A Mukasa, K Nakagawa  
*Med. Phys.* 41, 2014, 570.  
35. Reconstruction of the Treatment Area by Use of Sinogram in Helical Tomotherapy and conventional LINAC  
Akihiro Haga, University of Minnesota, The University of Tokyo, Osaka University, Scientific Symposium, July, 2014.  
36. Four-dimensional dose reconstruction by use of in-treatment data set  
Akihiro Haga, OSAKA, INDIANA, GRONINGEN symposium on Medical Physics, August 25-26, 2014, Groningen.

## 〔図書〕(計 2 件)

1. 初学者のための原子力・量子・核融合の事典第 4 章  
4.9 : 3 次元原体照射  
芳賀昭弘  
丸善出版
2. Stereotactic Body Radiation Therapy Chapter 19: Others:  
Four-dimensional Cone-Beam CT during SBRT  
Haga A. Kida S. Saotome N. Yamashita H. Masutani Y. and Nakagawa K.  
Springer.

## 〔その他〕

ホームページ等  
<http://www.u-tokyo-rad.jp/works/index.html>

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者  
芳賀 昭弘 (HAGA AKIHIRO)  
東京大学・医学部附属病院・助教  
研究者番号 : 30448021