

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21791194

研究課題名 (和文) 胸腹部への強度変調放射線治療の為に線量計算システムの開発

研究課題名 (英文)

Development of a dose calculation system for thoracic or abdominal IMRT

研究代表者

武川 英樹 (TAKEGAWA HIDEKI)

大阪大学・大学院医学系研究科・特任助教 (常勤)

研究者番号：60526870

研究成果の概要 (和文)：

MLC による動的な強度変調ビームと腫瘍の呼吸性移動、この 2 つの動的システム (Double Dynamic System) を考慮可能なモンテカルロ線量計算システムを開発した。

モンテカルロシミュレーションは動的な強度変調ビームの再現することを確認した。また 4DCT を用いた線量計算結果の検証をフィルム法により行い、高精度な精度計算が可能であることを示した。IMRT を治療計画した膵臓癌患者のデータを用いて Double Dynamic System を考慮した線量計算を行い、呼吸性移動の方向、大きさが線量分布に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

A Monte Carlo dose calculation system has been developed to account for double dynamic systems, which are dynamic intensity-modulated (IM) beam delivery based on MLC movement and respiratory organ motion.

The Monte Carlo simulation reproduced the dynamic IM beam delivery. The dose distribution calculated using 4DCT was verified and showed good agreement with film measurements. The dose distributions of pancreas IMRT plans were calculated and the effects of the direction of respiratory motion and respiratory amplitude on dose distribution were revealed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：強度変調放射線治療，呼吸性移動，線量計算，モンテカルロシミュレーション，Double dynamic system，4DCT，膵臓癌，肺癌

1. 研究開始当初の背景

強度変調放射線治療 (Intensity-modulated radiotherapy: IMRT) は、腫瘍に限局して高線量を照射しつつ正常組織への照射を減らすことが可能である。頭頸部癌や前立腺癌への IMRT では従来の放射線治療以下の有害事象に抑えつつ、同等または以上の局所制御率が得られている。

また IMRT は肺癌、肝臓癌、膵臓癌と予後不良の腫瘍への適応拡大が試みられている。胸腹部には肺、脊髄、消化管等の危険臓器が多数存在しており、IMRT の線量的優位性が期待される領域である。

IMRT はマルチリーフコリメータ (Multileaf collimator: MLC) により形成される小照射野を動的に変化させて照射する方法 (Dynamic MLC, Segmental MLC) が一般的であり、従来法と異なり照射される領域が時間変化する。また胸腹部の腫瘍は照射中に呼吸による動きが存在している。Dynamic MLC による照射を行った場合、動きを考慮しないと比べてその線量差は±8%にも達することが報告されている。

胸腹部での IMRT は動体 (腫瘍) に対して MLC による動的な照射を行うこととなり、2つの動的システム (*Double dynamic system*) の考慮が必要となる。しかし、現在の商用放射線治療計画システムは両者の動きを考慮した線量計算を行うことができない。胸腹部の IMRT で患者体内へ照射される線量を正確に計算する為には *Double dynamic system* に対応した線量計算システムの開発が必要となる。

2. 研究の目的

- (1) *Double dynamic system* を考慮したモンテカルロシミュレーションの実装を行う。
- (2) 動体ファントムを用いた実測によりシ

ステムの精度検証を行う。

- (3) 臨床症例へ応用し、線量計算システムの有用性を検討する。

3. 研究の方法

(1) MLC の動き (形状) 及び腫瘍の呼吸性移動の関連付けを行った。呼吸性移動を画像化する 4 次元 CT (4DCT) 撮影には外部呼吸モニタリング装置による呼吸信号の取得が必要となり、4DCT はその呼吸信号を基に再構成される。4DCT を構成する各位相画像と呼吸信号の対応関係は既知である為、MLC の動きと呼吸信号との対応関係を決定することで画像と MLC の動きの関連付けを行った。呼吸信号には Varian 社の Real-Time Position System (RPM) により得られるデータを用い、MLC の動きは治療計画装置から出力される DICOM-RT Plan ファイルまたは MLC リーフシーケンスファイルから得られるデータを用いた。呼吸信号、MLC の動き、4DCT 各位相の関連付けの例を図 1 に示す。

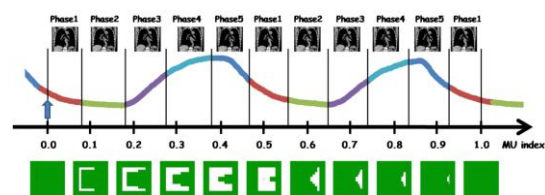


図 1 外部呼吸信号を介した 4DCT 構成位相画像と MLC リーフシーケンスの関連付け

実時間の代わりに照射割合を示す MUindex (照射開始時: 0, 照射終了時: 1) を用いて各位相画像に照射される MLC の動きを関連付けた。照射開始 (ビームオン) 時の呼吸位相は不明であるため、初期呼吸位相は任意とした。線量率 (DR), モニタユニット (MU) 値における照射開始後ある時間 t における MUindex は式 1 で示される。

$$MUindex = DR [MU/min] \cdot \frac{t [sec]}{60} \cdot \frac{1}{MU} \quad (1)$$

これにより、MUindex は実時間情報への変換が可能となり、呼吸信号との関連付けが行える。

(2) BEAMnrc, DOSXYZnrc をベースに我々が開発している Monte Carlo verification system (MCVS) を使用して線量計算システムを構築した。本モンテカルロコードで追跡される粒子は時間パラメータを保持しない為、MLC 形状に基づいた時間パラメータを保持するように改良を加えた。MCVS の MLC 部シミュレーションでは、MLC 形状を決定するために 0-1 の乱数を 1 つサンプルし、一致する MUindex での MLC 形状を採用している。この情報を粒子情報として新たに採用することで、時間情報を考慮した線量計算が可能となる。

(3) 呼吸性移動を再現する QUASAR プログラムプラットフォーム及び、水等価ファントム, RPM システムを用いて本システムの精度検証を行った (図 2)。

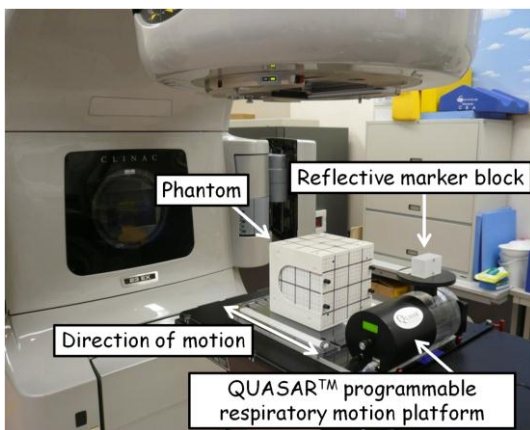


図 2 線量測定時における実験セットアップ

頭尾側に振幅 0.5cm, 周期 4 秒の正弦波で呼吸性移動を再現し、4DCT 撮影を行った。次に同条件で呼吸性移動を再現、逆ピラミッド形状の強度変調ビームの照射を行い、フィル

ム測定を行った。その際、RPM システムを用いてビームオン時点の呼吸位相の取得を行った。

(4) MCVS で測定と同条件での線量計算を行い、測定との比較を行った。使用画像は連続呼吸性移動を再現する 3DCT 画像+設定呼吸性移動の場合、離散的動きとなる 4DCT を用いた場合の 2 通りで行った。

(5) IMRT 治療計画を行った膵臓癌症例を用いた線量計算を行い、Double Dynamic System が線量分布に及ぼす影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 図 3 に 0.1 MUindex 毎の MLC 形状と線量分布を示す。MLC の動きに一致した線量分布の変化が観察され、動的な強度変調ビームシミュレーションの実装ができていることを確認した。

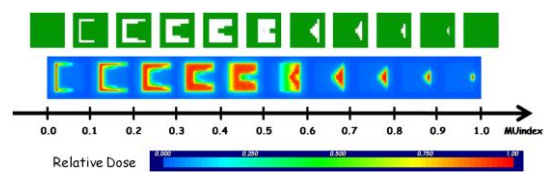


図 3 逆ピラミッド形状リーフシーケンスと 0.1 MUindex 毎の静止ファントム上での線量分布

(2) 図 4 に (a) 従来法でシミュレーションした場合と、(b) 0.1 MUindex 毎にシミュレーション後に積算した線量分布と等線量曲線の重ね合わせを示す。

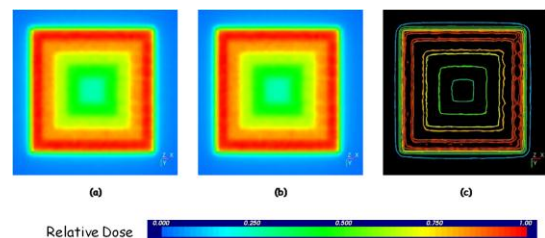


図 4 線量分布及び等線量曲線 (10, 30, 50,

70, 80, 90, 95, 100%)

両者に違いは観察されず、開発した手法による強度変調ビームのシミュレーションは従来の線量計算を再現することが確認された。

(3) 図5に呼吸性移動を有するファントムに対し (a, c) 従来法と (b, d) 開発したシミュレーションによる線量計算結果を示す。従来法では線量分布が動き方向 (頭尾側) にぼけているのに対し、開発した方法では Interplay Effect による線量分布の歪みが観察される。本結果より Double Dynamic System を再現した線量計算が行えていることが示された。

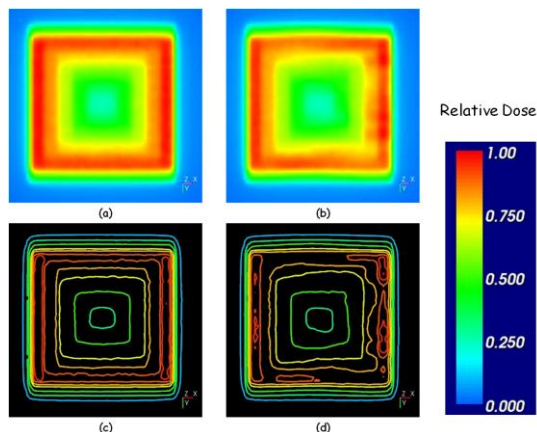


図5 線量分布及び等線量曲線 (10, 30, 50, 70, 80, 90, 95, 100%)

(4) 図6に精度検証結果を示す。

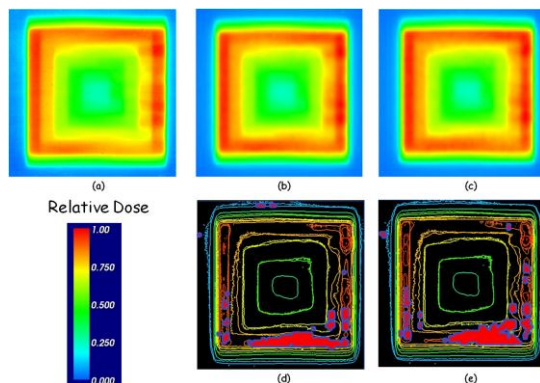


図6 線量分布及び等線量曲線 (10, 30, 50, 70, 80, 90, 95, 100%)

3%/3mm の基準値を用いたガンマ法による

(a) フィルム測定結果との比較では、(b, d) 3DCT 画像+設定呼吸性移動の場合は 93.5%、

(c, e) 4DCT を用いた場合は 91.7%の線量計算点でこの基準を満たし、よい一致を示した。

(5) 図7に膵臓癌症例における線量分布を示す。(a) 患者が静止を仮定している場合 (治療計画) に比べ、(b, c) 頭尾側に動く場合、

(d, e) 左右に動く場合は計算される線量分布に大きな変化が生じる。特に MLC 進行方向に動く場合は Interplay effect が大きく生じることがわかった。

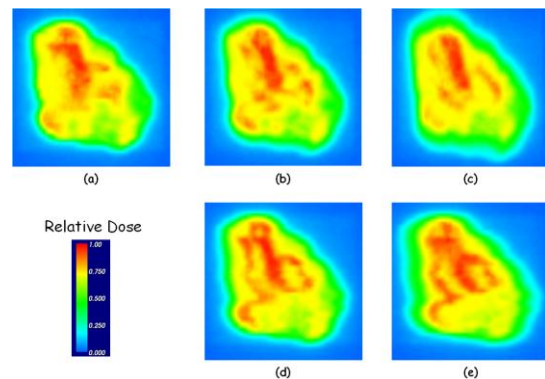


図7 線量分布

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3件)

① Takegawa H, Mukumoto N, Ueyama S, Tsujii K, Akimoto M, Miyazaki M, Takashina M, Numasaki H, Nishiyama K, Teshima T., Monte Carlo dose calculation accounting for double dynamic systems., Int J Radiat Oncol Biol Phys. 78:S761, 2010. (査読無)

② Ueyama S, Masai N, Oh R, Shiomi H, Yamada K, Akimoto M, Takegawa H, Numasaki H, Inoue T, Teshima T., 4D Treatment Planning for Lower Thoracic Spine Metastasis: Impacts of Respiratory Motion on Dose Distributions, Int J

Radiat Oncol Biol Phys. 78:S764, 2010.

(査読無)

③ Mukumoto N, Tujii K, Saito S, Yasunaga M, Takegawa H, Yamamoto T, Numasaki H, Teshima T., A preliminary study of in-house Monte Carlo simulations: An integrated Monte Carlo verification system., Int J Radiat Oncol Biol Phys. 75:571-579, 2009. (査読有)

[学会発表] (計 20 件)

① 小野智博, 武川英樹, 高階正彰, 松本政雄, 手島昭樹, 加速度センサを用いた呼吸コーチングシステムの精度検証, 第 297 回 日本医学放射線学会関西地方会, 2011.2.5, 大阪

② 秋元麻未, 武川英樹, 西山謹司, 高階正彰, 手島昭樹, 松本政雄, 前立腺がんの放射線治療におけるマージンの評価, 2010 年度 日本写真学会秋季研究発表会, 2010.11.30, 京都

③ 金岡尚利, 武川英樹, 秋元麻未, 手島昭樹, 松本政雄, 頭頸部 2phase IMRT における線量積算法, 第 296 回 日本医学放射線学会関西地方会, 2010.11.13, 大阪

④ Takegawa H, Mukumoto N, Ueyama S, Tsujii K, Akimoto M, Miyazaki M, Takashina M, Numasaki H, Nishiyama K, Teshima T., Monte Carlo dose calculation accounting for double dynamic systems., 52nd Annual Meeting of American Society of Radiation Oncology, 2010.10.31, San Diego, USA

⑤ Ueyama S, Masai N, Oh R, Shiomi H, Yamada K, Akimoto M, Takegawa H, Numasaki H, Inoue T, Teshima T., 4D Treatment Planning for Lower Thoracic Spine Metastasis: Impacts of Respiratory Motion on Dose Distributions., 52nd Annual Meeting of American Society of Radiation Oncology, 2010.10.31, San Diego, USA

⑥ 上山新吾, 正井範尚, 呉隆進, 塩見浩也, 山田広一, 秋元麻未, 武川英樹, 沼崎穂高, 井上俊彦, 手島昭樹, 脊椎照射における Risk に関する検討-3 -呼吸性移動の影響-, 第 22 回 日本高精度放射線外部照射研究会, 2010.7.31, 滋賀

⑦ 北村貴明, 武川英樹, 椋本宣学, 秋元麻未, 上山新吾, 沼崎穂高, 手島昭樹, Cone-beam CT 投影画像を用いた呼吸信号の抽出, 第 99 回 日本医学物理学学会学術大会, 2010.4.10, 横浜

⑧ 小野智博, 武川英樹, 上山新吾, 椋本宣学, 沼崎穂高, 手島昭樹, MLC を用いた動体追跡照射における線量分布評価, 第 99 回 日本医学物理学学会学術大会, 2010.4.10, 横浜

⑨ 林達也, 武川英樹, 椋本宣学, 上山新吾, 沼崎穂高, 手島昭樹, フラットニングフィルタ除去リニアックの線量特性, 第 99 回 日本医学物理学学会学術大会, 2010.4.10, 横浜

⑩ 秋元麻未, 塩見浩也, 正井範尚, 呉隆進, 山田広一, 岸和史, 出水祐介, 武川英樹, 井上俊彦, 松本政雄, Deformable registration を用いた肺の呼吸性移動の評価, 第 294 回 日本医学放射線学会関西地方会, 2010.2.6, 大阪

⑪ 上石達也, 武川英樹, 椋本宣学, 林達也, 上山新吾, 沼崎穂高, 手島昭樹, 加速度センサを用いた呼吸モニタリング, 第 21 回 日本高精度放射線外部照射研究会, 2010.1.30, 熊本

⑫ 椋本宣学, 武川英樹, 辻井克友, 上山新吾, 沼崎穂高, 西山謹司, 手島昭樹, Monte Carlo 法を用いた高精度放射線治療のための線量計算システムの開発及び胸腹部 DMLC IMRT への適応, 第 21 回 日本高精度放射線外部照射研究会, 2010.1.30, 熊本

⑬ 上山新吾, 武川英樹, 棕本宜学, 辻井克友, 沼崎穂高, 西山謹司, 手島昭樹, モンテカルロ法による IMRT 治療計画の線量再計算 -GBM 症例-, 第 293 回 日本医学放射線学会関西地方会, 2009.10.17, 大阪

⑭ 上田悦弘, 武川英樹, 宮崎正義, 岡本英明, 川辺清人, 鈴木修, 中村聡明, 西山謹司, 体幹部定位照射における治療計画時と治療時の肺腫瘍呼吸性移動の比較, 日本放射線腫瘍学会第 22 回学術大会, 2009.9.19, 京都

⑮ 武川英樹, 棕本宜学, 上山新吾, 辻井克友, 西山謹司, 手島昭樹, Double dynamic system を考慮した線量計算 - システム開発 -, 第 98 回 日本医学物理学会学術大会, 2009.9.18, 京都

⑯ 棕本宜学, 武川英樹, 辻井克友, 上山新吾, 沼崎穂高, 西山謹司, 手島昭樹, Double dynamic system を考慮した線量計算 - Interplay 効果の評価 -, 第 98 回 日本医学物理学会学術大会, 2009.9.17-19, 京都

⑰ 辻井克友, 武川英樹, 宮崎正義, 岡本英明, 川邊清人, 手島昭樹, 西山謹司, Monaco 治療計画システムにおける MLC 構造由来の線量特性の評価, 日本放射線腫瘍学会第 22 回学術大会, 2009.9.18, 京都

⑱ 上山新吾, 辻井克友, 棕本宜学, 石原佳知, 武川英樹, 沼崎穂高, 手島昭樹, Monte Carlo 法を用いた Varian millennium MLC のモデリング及び IMRT 対応コード開発, 第 97 回 日本医学物理学会大会, 2009.4.19, 横浜

⑲ 上田悦弘, 武川英樹, 谷口真, 宮崎正義, 岡本英明, 川辺清人, 堀之内隆, EPID シネ画像を用いた肺腫瘍の呼吸性移動の解析, 第 65 回 日本放射線技術学会総合学術大会, 2009.4.19, 横浜

⑳ 秋元麻未, 武川英樹, 棕本宜学,

川辺清人, 西山謹司, 手島昭樹, 松本政雄, 前立腺癌の放射線治療における 2D-X 線画像による補正後の residual setup error の評価, 第 65 回 日本放射線技術学会総合学術大会, 2009.4.16-19, 横浜

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武川 英樹 (TAKEGAWA HIDEKI)

大阪大学・大学院医学系研究科・特任助教
(常勤)

研究者番号 : 60526870