

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05235

研究課題名(和文) 標的の不均質性と動きを考慮したロバストな陽子線スキャンニング治療技術の開発

研究課題名(英文) Development of robust proton beam scanning treatment technology considering target heterogeneity and movement

研究代表者

梅垣 菊男 (Umegaki, Kikuo)

北海道大学・工学研究院・特任教授

研究者番号：40643193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：スポットスキャンニング照射方式を採用した最新の陽子線治療システムを対象に、がん病巣の形状に合わせて3次元線量分布をコントロールし、位置決めや標的の動きに起因する線量誤差を確率的に評価する方法を用いて、正常組織への影響を最小化する線量分布最適化方法を提案した。がん病巣の囲い込みと周囲一律のマージン付与という従来の治療計画の考え方を超えて、照射ビーム位置や患者位置決め誤差、呼吸等による標的の動きによる誤差、体内構造変化による陽子線の飛程変化等、陽子ビーム特有の非等方性を考慮した線量誤差の発生確率分布を明らかにして、ゲーティングを含むロバストな照射方法を構築し、陽子線治療装置を用いて評価、実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、将来の放射線治療の切り札として期待されているスキャンニング方式の粒子線治療において、新たに確率/統計的手法を用いて位置決め誤差や呼吸等による標的の移動誤差による線量分布誤差を評価し、最適な治療計画を策定する指針を提示することを試みた。学術的には、線量誤差の確率分布を考慮したロバストな照射パラメータの最適化やトレードオフスタディ方法を考案し、陽子線治療センターで実践した。その結果、従来の治療計画の枠組みを越えた、照射プロセス全体のロバストな最適化が可能になった。今後も検証と実績評価を経て臨床現場に適用していく予定である。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a new approach of treatment plan optimization method considering the probability distribution of dose error caused by the various uncertainties in proton beam therapy. The three-dimensional dose distribution is optimized to irradiate the target tumor while sparing the normal tissue by controlling the dose for each spot with intensity modulation. We have evaluated probabilistic dose errors caused by variation of individual device performance, patient positioning error, target tumor movement under respiration, etc.. The dose error considering the anisotropy unique to the proton beam is also clarified. Beyond the conventional treatment plan concept of contouring the tumor shape and providing a uniform margin, we have constructed a robust optimization method considering the probability distribution of dose error. The method was evaluated and demonstrated using the actual proton beam therapy system.

研究分野：医学物理学

キーワード：粒子線治療学 粒子線治療計画 動体追跡粒子線治療

1. 研究開始当初の背景

粒子線治療は、がん病巣にのみ線量を集中して正常組織への線量を低減できるがん治療法として期待されている。本研究で対象とする陽子線治療は現在最も普及している粒子線治療であり、近年大きな発展を遂げている。従来の陽子線治療では、がん病巣に様に照射することを基本に、散乱体やリッジフィルタを通して陽子ビームを広げ、コリメータ、ボラスを使用してがん病巣の形状に合わせるという照射方法が採用されていた。これに対し、申請者らは国家プロジェクト「分子追跡陽子線治療装置の開発 2009～2013 年度:中心研究者白土博樹」を通じて上記のビーム形成のための治具を必要としないスキャニング専用の陽子線治療装置を開発すると共に、呼吸等で移動するがん病巣を捉える動体追跡技術とスポットスキャニング技術を融合した新たな照射法を北大と(株)日立製作所の産学連携で開発した。粒子線スキャニング照射技術は、その重要性から臨床適用が徐々に始められ、次世代の粒子線治療を担う技術として期待されている。

放射線治療の 9 割以上を担う X 線治療は、2 次元照射、3 次元コンフォーマル照射を経て IMRT(Intensity Modulated Radiation Therapy)に発展してきた。各方向の照射野で強度を変調して線量分布を最適化する IMRT の概念は、一様照射を基本としてきたこれまでの放射線治療の考え方を大きく変えた。陽子線治療におけるスポットスキャニング技術は、スポット毎の線量を制御することにより、X 線治療の IMRT がコリメータで強度変調を実現する以上に高い自由度で線量分布を最適化することが可能になる。

これまでの陽子線治療の線量分布最適化は、ターゲットのがん病巣を囲んだ領域(いわゆるターゲットボリューム:CTV, ITV, PTV 等で種々のマージンを含む)に対して静的な条件のもとで、各方向から一様な線量を照射することが前提となっており、標的がん病巣やビームパス上の重要臓器を考慮した強度変調は、臨床現場ではまだ十分に実用化されていない。また、陽子線治療のような切れの良い線量分布を実現する線質の場合には、位置誤差で生じる線量の変化の影響が標的境界において逆に大きくなる傾向がある。

ターゲットの位置とまわりの正常組織との関係に応じて、陽子線のスポットサイズ毎に線量を調整することができれば、スポットサイズの空間スケール(数 mm)で標的がん病巣と正常組織の位置関係に対応した線量分布を形成し、かつ位置誤差への感度を下げたロバスタな線量分布最適化が実現できる可能性がある。またそれがスポットスキャニング方式の最大の利点とも言える。

さらに、適切な線量分布を実現するために重要なことは、呼吸等によるがん病巣の動きに対応することである。静的な条件のもとで最適な線量を照射する計画を立ててもターゲットの動きにより大きくずれてしまう可能性がある。そのため申請者らは動体追跡技術を用いて計画位置にターゲットがあるときのみ照射するゲーティング法を用いているが(Matsuura et al, Med. Phys. 40, 2013)、それでも残る位置誤差を考慮した線量分布最適化、ロバスタ性確保が必要である。スポット スキャニング法の特徴は、位置誤差が重なることで最終的に線量分布の誤差を発生するという点である。この線量誤差は位置誤差の発生確率を定義できれば、統計的評価が可能である。

がん病巣の囲い込みと一様線量分布形成といった、X 線治療や散乱体方式の粒子線治療を対象とした従来の治療計画の枠を超えて、標的がん病巣やビームパス上の重要臓器を考慮した適切な線量分布の形成、線量分布に対応した位置決め誤差、動きの追跡誤差の評価、ビームの誤差の非等方性等全体の誤差を考慮して、誤差発生確率分布も含めてがん病巣の治療に対してロバスタな治療最適化を実現することが、陽子線スポットスキャニングのような新しい照射法の長所を最大限に活用するには不可欠である。しかし、臨床実績に基づくこれまでの治療計画はたやすくその考え方を変えられるものではなく、ロバスタな線量分布最適化法の提案、解析、試験による検証、実績評価を積み重ねて初めて新たな照射、治療計画システムを提案できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代のがん放射線治療を担うスキャニング照射方式を採用した陽子線治療システムを対象に、がん病巣の形状や性質に合わせて標的内の 3 次元線量分布を自在にコントロールし、かつ位置決めや標的の動きに起因する誤差も考慮して正常組織への影響を最小化するロバスタな治療最適化技術を提案することにある。がん病巣の囲い込みと標的内の一様線量分布形成、マージン付与という従来の治療計画の考え方を超えて、標的がん病巣の位置決め誤差、標的の動きによる誤差(含ゲーティング照射)、陽子ビーム特有の誤差の非等方性等、全体の誤差

バランスを考慮し、新たに誤差発生の確率分布を明らかにして、線量分布に与える影響を評価する。また、生物学的な線量評価を加えて、標的がん病巣の治療、正常組織の保護に対してロバストな治療最適化方法を提案し、最先端の陽子線治療装置を用いて評価、実証する。

3. 研究の方法

本研究では、研究内容、方法を以下のように策定した。

(1) スポットスキニングの特徴を活かした標的目標線量分布設定と照射方法確立

がん病巣の形状や性質に合わせ、標的位置の誤差(確率分布で評価)に対する感度を考慮して標的内目標線量分布を設定する手法を確立し、それに合わせてスポット毎の線量をコントロールし、単/多方向からの照射により目標線量分布を実現する照射方法を確立する。IMPT(Intensity Modulated Proton Therapy)とロバスト照射法を融合させた新たな照射法を構築する。

(2) 動く標的の空間移動方向とビーム照射方向を考慮したロバストな線量分布最適化方法の開発

申請者らがX線治療で得た動体追跡データを活用し、動く標的の空間移動方向、距離とビーム照射方向の相対的関係を考慮したロバストな線量分布最適化方法を開発する。

(3) 臨床的観点からの線量最適化トレードオフスタディの実現

標的に対してどのような線量分布が適切か、確率的な誤差評価も加えて臨床的観点から検討すると共に、隣接するCritical Organ(正常組織)に及ぼす影響もふまえたトレードオフスタディのプロセスを確立し、ケーススタディによりロバスト性を踏まえた臨床的評価を実施する。

4. 研究成果

平成 28 年度は、

(1) 治療室における透視画像装置を用いた場合の位置決め誤差、呼吸等で移動する動きの誤差等、種々の要因による腫瘍の位置誤差と、粒子線照射装置の持つビーム方向、平面方向の非等方な線量誤差を統計的な方法を用いて評価した。

(2) 動く腫瘍に対して照射できる範囲を限定するゲート照射の効果を評価した。IMPT(強度変調陽子線治療)の考え方にに基づき、各照射方向において非一様な線量分布を策定した場合の線量分布の形成方法を策定すると共に、生物学的な効果を考慮した生物線量付与の考え方を検討した。腫瘍の呼吸性移動の実測データに基づき、動く標的の分析を実施し、腫瘍近傍に埋め込んだマーカの位置に基づいた呼吸移動の数理モデルを開発した。

(3) 上記の位置誤差、呼吸等で移動する動きの誤差の統計的評価に基づき、がん病巣と隣接臓器の線量分布変化を評価し、設定する空間的マージンとの関係を検討した。

平成 29 年度は、

(1) スポットスキニングの特徴を活かした標的目標線量分布の設定と照射方法の開発において、IMPT(強度変調陽子線治療)の考え方にに基づき、正常組織への線量を下げつつ腫瘍への線量集中をより高めた、一方向、多方向照射による標的目標線量分布の形成方法を検討した。また、統計的/確率的評価に基づく位置誤差に基き、スキニングに対してロバストな線量分布形成方法を検討し、同時にLET、RBE等の生物学的効果等の可視化方法、それらの効果を考慮した標的陽子線線量分布最適化方法を検討した。

(2) 動く標的の空間移動方向とビーム照射方向を考慮した線量分布最適化方法の開発においては、治療時の実測データに基づく腫瘍の移動(主に呼吸性移動)に対して、移動方向をビーム照射方向とスキニング平面方向に分解した幾何学的モデルを開発し、動く標的の空間移動方向とビーム照射方向の相関を考慮した線量分布誤差を統計的/確率的に評価した。

(3) 臨床的観点からの治療計画最適化とトレードオフスタディの実現においては、統計的/確率的評価に基づく位置誤差を考慮した腫瘍と隣接重要臓器の線量分布に基づき、臨床的観点からの治療計画における線量最適化とトレードオフスタディの評価モデル/方法を検討した。これらの開発と並行して、海外の粒子線治療研究者との情報交換、交流を深め、スキニングを用いた陽子線(粒子線)治療におけるガイドラインを共同で執筆して国際専門誌に投稿し、掲載された。

平成 30 年度は、

(1) 実際の臨床における標的マーカの呼吸性移動データを用い、ゲーティングで生じるスポッ

ト位置誤差の確率的/統計的評価を実施した。その結果に基づき、線量分布誤差低減と照射効率向上の観点でロバストなスキャンニング線量分布形成方法を提案した。また、生物学的効果等を考慮した一方向、多方向照射陽子線線量分布形成法に基づくロバストな治療計画策定方法を検討した。

(2) 実際の臨床における標的腫瘍（標的マーカ）の呼吸性移動をモデル化し（図1）、移動方向と照射ビームの方向の相関に基づいて、腫瘍の位置誤差の確率分布（図2）をもとに、4次元線量分布誤差を統計的に評価し（図3）線量分布誤差を低減する陽子線特有の照射ゲーティング法による線量分布最適化方法を提案した。

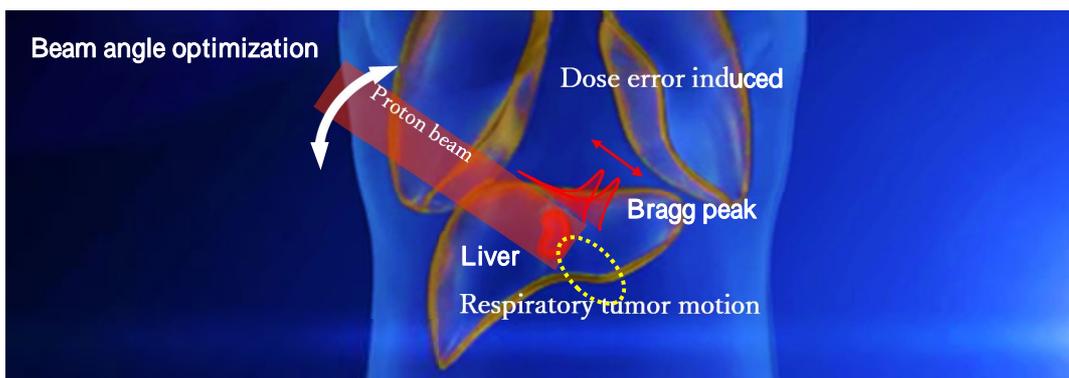


図1 呼吸による標的腫瘍の動きのモデル化

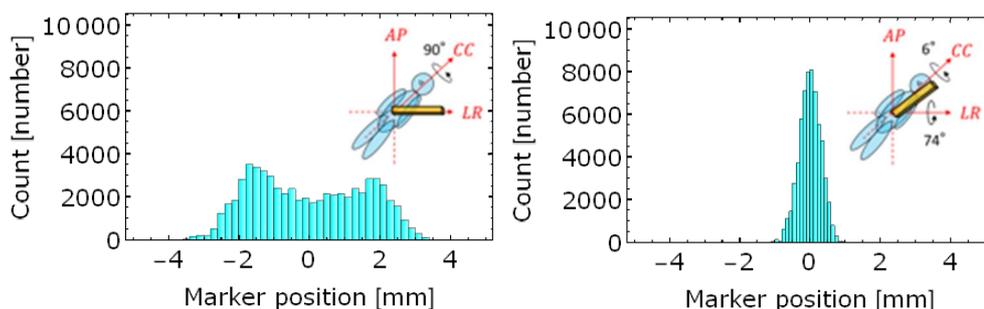


図2 照射方向に対応した標的腫瘍位置誤差の確率密度分布の例

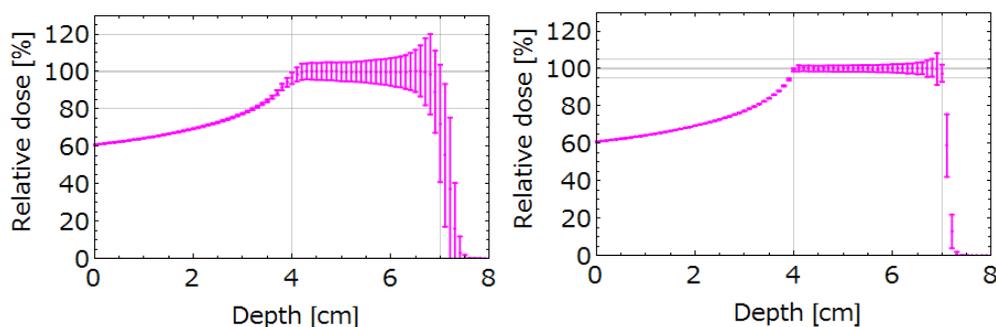


図3 照射方向に対応した標的腫瘍の深さ方向の線量誤差の例（±幅は標準偏差）

(3) 臨床的観点からの治療計画最適化とトレードオフスタディの実現:位置誤差の確率的/統計的評価に基づき、線量誤差と照射効率(治療時間)をパラメータとしたトレードオフスタディの方法を開発し、臨床データを用いて比較検討した。

平成31年度は、

(1) 装置性能、位置決め、標的の動きで生じるスポット位置誤差の確率的/統計的評価に基づき、

線量分布誤差低減と照射効率向上の観点でロバストなスキャン線量分布形成方法を提案した。また、生物学的効果等を考慮した一方向、多方向照射陽子線線量分布形成法に基づくロバストな治療計画評価方法を構築した。

(2) 動く標的の空間移動方向と陽子ビームの照射方向/スキャン方向を考慮し、可変ゲート幅を用いた照射ゲーティングによる4次元線量分布最適化方法を考案した(図4)。

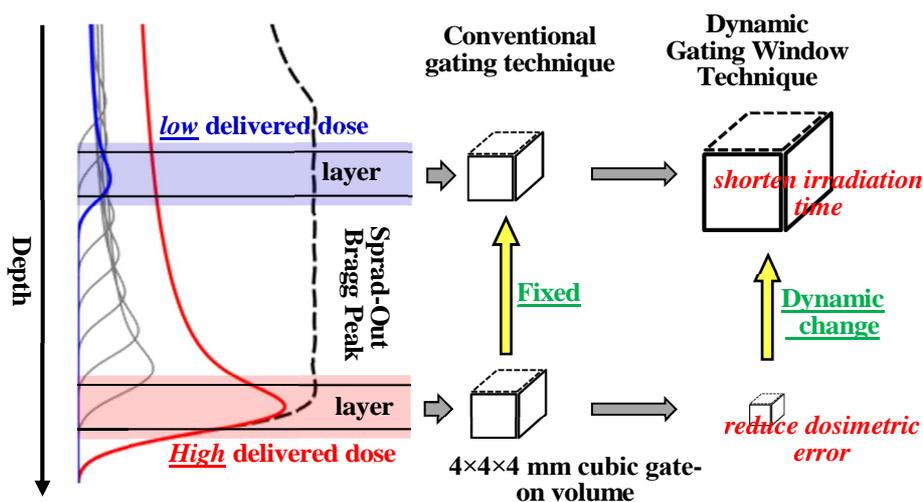


図4 可変ゲート幅を用いた照射ゲーティングによる4次元線量分布最適化方法

(3) 空間的位置誤差の評価に加え、生物学的効果等も考慮した病巣と隣接重要臓器の線量分布を評価し、トレードオフスタディを実施した。

以上をまとめると、本研究により陽子線照射スポット位置誤差の統計的/確率的評価に基づく線量分布誤差、ロバスト性評価方法を構築した。また、移動する標的腫瘍に対して、陽子ビームの照射方向/スキャン方向を考慮し、ゲート幅を可変とした照射ゲーティング法による4次元線量分布最適化方法を考案した。加えて多方向照射(強度変調を含む)を用いた治療計画において、生物学的効果等を考慮したがん病巣と重要臓器(Critical Organ)のロバストな最適目標線量分布形成方法を考案し、がん病巣線量・正常臓器線量のトレードオフスタディに適用した。開発した一連の手法、技術は、治療計画、治療評価プロセスに沿って段階的にシステム化し、実際の治療現場に活かせるようにした。線量分布に関しては、実際の陽子線治療センターにおいて、QA、ビーム照射実績塔によって検証した。並行して、本研究で得られた総合的な知見を、スポットスキャン粒子線治療の新たなガイドラインとして、他の粒子線治療施設と協力して、医学物理学会を通じて提案している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 17件）

1. 著者名 Hirayama S, Matsuura T, Yasuda K, Takao S, Fujii T, Miyamoto N, Umegaki K, Shimizu S,	4. 巻 Epub ahead of print
2. 論文標題 Difference in LET based biological doses between IMPT optimization techniques: Robust and PTV based optimizations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Clinical Medical Physics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/acm2.12844	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Miyamoto N, Yokokawa K, Takao S, Matsuura T, Tanaka S, Shimizu S, Shirato H, Umegaki K,	4. 巻 Epub ahead of print
2. 論文標題 Dynamic gating window technique for the reduction of dosimetric error in respiratory-gated spot-scanning particle therapy: An initial phantom study using patient tumor trajectory data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Clinical Medical Physics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/acm2.12832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yoshimura T, Shimizu S, Hashimoto T, Nishioka K, Katoh N, Inoue T, Taguchi H, Yasuda K, Matsuura T, Takao S, Tamura M, Ito YM, Matsuo Y, Tamura H, Horita K, Umegaki K, Shirato H,	4. 巻 21(2)
2. 論文標題 Analysis of treatment process time for real time image gated spot scanning proton beam therapy (RGPT) system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Clinical Medical Physics	6. 最初と最後の頁 38-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/acm2.12804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yokokawa K, Furusaka M, Matsuura T, Hirayama S, Umegaki K	4. 巻 67
2. 論文標題 A new SOBP-formation method by superposing specially shaped Bragg curves formed by a mini-ridge filter for spot scanning in proton beam therapy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 70-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejmp.2019.10.036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hirayama S, Matsuura T, Ueda H, Fujii Y, Fujii T, Takao S, Miyamoto N, Shimizu S, Fujimoto R, Umegaki K, Shirato H	4. 巻 45
2. 論文標題 An Analytical Dose-Averaged LET-Calculation Algorithm Considering the Off-Axis LET Enhancement by Secondary Protons for Spot-Scanning Proton Therapy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 3404-3416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mp.12991	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mori S, Knopf A C, Umegaki K	4. 巻 45
2. 論文標題 Motion management in particle therapy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 e994-e1010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mp.12679	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Y. Chang, X. Zhang, A. Knopf, H. Li, S. Mori, L. Dong, H-M. Lu, W. Liu, S. N. Badiyan, S. Both, A.Meijers, L. Lin, S. Flampouri, Z.Li, K. Umegaki, C. B. Simonell and X. R. Zhu	4. 巻 99
2. 論文標題 Consensus Guidelines for Implementing Pencil-Beam Scanning Proton Therapy for Thoracic Malignancies on Behalf of the PTCOG Thoracic and Lymphoma Subcommittee	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics	6. 最初と最後の頁 41-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrobp.2017.05.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Fujii, T. Matsuura, S. Takao, Y. Matsuzaki, T. Fujii, N. Miyamoto, K. Umegaki, K. Nishioka, S. Shimizu and H. Shirato	4. 巻 58
2. 論文標題 A simulation study on the dosimetric benefit of real-time motion compensation in spot-scanning proton therapy for prostate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 591-597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rrx020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Yamada, N. Miyamoto, T. Matsuura., S. Takao., Y. Fujii., Y. Matsuzaki, H. Koyano, M. Umezawa, H. Nihongi, S. Shimizu, H. Shirato and K. Umegaki	4. 巻 32
2. 論文標題 Optimization and evaluation of multiple gating beam delivery in a synchrotron-based proton beam scanning system using a real-time imaging technique	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 932-937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.ejmp.2016.06.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Yoshimura, R. Kinoshita, S. Onodera, C. Toramatsu, R. Suzuki, Y. Ito, S. Takao, T. Matsuura, Y. Matsuzaki, K. Umegaki, H. Shirato and S. Shimizu	4. 巻 32
2. 論文標題 NTCP modeling analysis of acute hematologic toxicity in whole pelvic radiation therapy for gynecologic malignancies - A dosimetric comparison of IMRT and spot-scanning proton therapy (SSPT)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 1095-1102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.ejmp.2016.08.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Kanehira, T. Matsuura, S. Takao, Y. Matsuzaki, Y. Fujii, T. Fujii, Y. Ito, N. Miyamoto, T. Inoue, N. Katoh, S. Shimizu, K. Umegaki, and H. Shirato	4. 巻 97
2. 論文標題 Impact of Real-Time-Image Gating on Spot Scanning Proton Therapy for Lung Tumors: A Simulation Study	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics	6. 最初と最後の頁 173-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.09.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計55件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 30件)

1. 発表者名 Kasamatsu K, Hosoda M, Nam J-M, Yasui H, Tanaka S, Hirayama S, Miyamoto N, Umegaki K, Shirato H, Matsuura T,
2. 発表標題 Dependence of the Sub-Lethal Damage Repair Rate on LET in Proton Irradiation : An Initial Study
3. 学会等名 第118回日本医学物理学学会学術大会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hirayama S, Matsuura T, Kobashi K, Koyano H, Fuji Ti, Takao S, Miyamoto N, Umegaki K, Shirato H, Shimizu S,
2 . 発表標題 Development of a system to support intra-fractional clinical decision for real-time image-gated proton therapy; (1) Automatic actual-dose calculation system
3 . 学会等名 第117回日本医学物理学会学術大会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tamura H, Shimizu S, Nishioka K, Hashimoto T, Yoshimura T, Matsuo Y, Matsuura T, Takao S, Umegaki K, Shirato H
2 . 発表標題 Prostate position deviation during real-time-image gated spot-scanning proton therapy (RGPT) for prostate cancer
3 . 学会等名 115th Scientific Meeting of JSMP (Japanese Society of Medical Physics), Yokohama, Japan
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Sodeta T, Matsuura T, Takao S, Hirayama S, Kanehira, T, Miyamoto N, Shimizu S, Umegaki K, Shirato H
2 . 発表標題 A study on the influence of changing the motion recognition rate on the dose accuracy of spot-scanning proton therapy
3 . 学会等名 115th Scientific Meeting of JSMP (Japanese Society of Medical Physics), Yokohama, Japan
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Hirayama S, Matsuura T, Ueda H, Fujii Y, Fujii T, Takao S, Miyamoto N, Shimizu S, Fujimoto R, Umegaki K, Shirato H
2 . 発表標題 Development of an analytical dose-averaged LET calculation method using a dual-LET-kernel model for spot-scanning proton therapy
3 . 学会等名 115th Scientific Meeting of JSMP (Japanese Society of Medical Physics), Yokohama, Japan
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Hirayama S, Matsuura T, Ueda H, Fujii Y, Fujii T, Takao S, Shimizu S, Fujimoto R, Umegaki K, Shirato H
2 . 発表標題 Development of analytical dose-averaged LET calculation algorithm for spot-scanning proton therapy
3 . 学会等名 Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG) 57th Annual Conference, Cincinnati, USA (2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Sodeta T, Matsuura T, Takao S, Hirayama S, Kanehira T, Miyamoto N, Nishioka K, Kato N, Shimizu S, Umegaki K, Shirato H
2 . 発表標題 A Study On the Influence of Changing the Motion Recognition Rate On the Dose Accuracy of Spot-Scanning Proton Therapy
3 . 学会等名 AAPM 60th Annual Meeting & Exhibition, Nashville, USA (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Fujii T, Takao S, Shimizu S, Matsuura T, Miyamoto N, Hirayama S, Umegaki K, Shirato H
2 . 発表標題 4D-CBCT technique with fiducial marker-position to reconstruct a volumetric image just before the treatment proton beam delivery in RGPT
3 . 学会等名 116th Scientific Meeting of JSMP (Japanese Society of Medical Physics), Morioka, Japan
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Unno S, Fujii T, Ueda H, Fujita Y, Takao S, Umegaki K
2 . 発表標題 A study of checking method for Water-Equivalent Thickness change using CBCT in Proton Therapy
3 . 学会等名 116th Scientific Meeting of JSMP (Japanese Society of Medical Physics), Morioka, Japan
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Ishida K, Miyamoto N, Yokokawa K, Umegaki K
2. 発表標題 Evaluation of Dosimetric Error for Real-Time Motion Tracking Irradiation for Scanning Directions in Proton Beam Therapy
3. 学会等名 116th Scientific Meeting of JSMP (Japanese Society of Medical Physics), Morioka, Japan
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fujita Y, Takao S, Ueda H, Fujii T, Unno S, Yasuda K, Shimizu S, Umegaki K
2. 発表標題 Development of interactive image registration method between planning CT and CBCT for proton therapy
3. 学会等名 116th Scientific Meeting of JSMP (Japanese Society of Medical Physics), Morioka, Japan
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Arai Y, Miyamoto N, Ueda H, Umegaki K
2. 発表標題 Clinical feasibility of target tumor localization algorithm using multiple fiducial markers for Real-time Tumor-tracking Proton Therapy
3. 学会等名 116th Scientific Meeting of JSMP (Japanese Society of Medical Physics), Morioka, Japan
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuda K, Takao S, Matsuo Y, Yoshimura T, Tamura M, Minatogawa H, Dekura Y, Matsuura T, Onimaru R, Shiga T, Shimizu S, Umegaki K, Shirato H
2. 発表標題 Intensity-modulated Proton Therapy with Dose Painting based on Hypoxia Imaging for Nasopharyngeal Cancer
3. 学会等名 The 60th Annual meeting for American Society for Radiation Oncology (ASTRO), San Antonio, USA (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shimizu S, Yoshimura T, Katoh N, Inoue T, Hashimoto T, Nishioka K, Takao S, Matsuura T, Miyamoto N, Ito M. Y, Umegaki K, Shirato H
2 . 発表標題 Analysis of Beam Delivery Times and Dose Rates for the Treatment of Mobile Tumors Using Real Time Image Gated Spot-Scanning Proton Beam Therapy
3 . 学会等名 The 60th Annual meeting for American Society for Radiation Oncology (ASTRO), San Antonio, USA (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Fujii, T. Matsuura, S. Takao, N. Miyamoto, S. Hirayama, K. Umegaki, S. Shimizu, T. Umezawa, R. Baba, H. Shirato
2 . 発表標題 Analysis software to evaluate deviation of water-equivalent thickness along proton beam path between Plan CT and CBCT for proton therapy
3 . 学会等名 The 113th Scientific meeting the Japan Society of Medical Physics
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Hirayama, T. Matsuura, H. Koyano, S. Takao, T. Fujii, N. Miyamoto, S. Shimizu, Y. Fujii, T. Yamada, H. Nihongi, T. Umezawa, R. Fujimoto, K. Umegaki, H. Shirato
2 . 発表標題 The retrospective interplay effect evaluation for real-time image-gated proton therapy using the fiducial marker motion and treatment machine log
3 . 学会等名 The 113th Scientific meeting the Japan Society of Medical Physics
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Fujii, T. Matsuura, S. Takao, N. Miyamoto, S. Hirayama, K. Umegaki, S. Shimizu, T. Umekawa, H. Shirato
2 . 発表標題 Evaluation of Water-Equivalent-Thickness (WET) deviation between Plan CT and Re-plan CT for prostate cancer in Spot-Scanning Proton-beam Therapy
3 . 学会等名 8th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Hirayama, T. Matsuura, H. Ueda, H. Koyano, S. Takao, T. Fujii, N. Miyamoto, S. Shimizu, Y. Fujii, R. Fujimoto, K. Umegaki, H. Shirato
2 . 発表標題 Evaluation of the sensitivity to variable RBE considering LET dependence for the robust optimization and the PTV-based optimization
3 . 学会等名 8th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Arai, N. Miyamoto, H. Ueda, H. Nakagawa, K. Umegaki
2 . 発表標題 Target tumor localization algorithm using multiple fiducial markers for Real-time Tumor-tracking Radiation Therapy
3 . 学会等名 8th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Nakagawa, N. Miyamoto, H. Ueda, K. Yokokawa, Y. Arai, S. Hirayama, K. Umegaki
2 . 発表標題 Method for reducing depth dose error using a statistical respiratory motion model with beam angle optimization in proton beam therapy
3 . 学会等名 8th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Unno, T. Fujii, H. Ueda, S. Takao, T. Ano, K. Umegaki
2 . 発表標題 An evaluation of Water-Equivalent path Length Change along proton beam paths in Real-time Tumor-tracking Proton Therapy
3 . 学会等名 8th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 S Hirayama, T Matsuura, H Ueda, H Koyano, S Takao, T Fujii, Y Fujii, R Fujimoto, S Shimizu, K Umegaki, H Shirato
2. 発表標題 An Analytical Approach for Calculating the Dose-Averaged LET in Spot-Scanning Proton Therapy with An Input Derived From a Monte Carlo Simulation
3. 学会等名 AAPM(The American Association of Physicists in Medicine) 59th Annual Meeting & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K Yokokawa, K Umegaki, T Matsuura, S Hirayama, M Furusaka
2. 発表標題 A New SOBP-Formation Method by Superposing Specially Designed Composite Bragg Curves (CBCs) for Spot Scanning Proton Beam Therapy
3. 学会等名 AAPM(The American Association of Physicists in Medicine) 59th Annual Meeting & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T Matsuura, S Hirayama, H Koyano, S Takao, T Fujii, T Yamada, Y Fujii, H Nihongi, S Shimizu, K Umegaki, H Shirato
2. 発表標題 Development of a System for Evaluating the Actual Dose Distribution in Respiratory-Gated Spot-Scanning Proton Therapy Using Real-Time Image Guidance
3. 学会等名 AAPM(The American Association of Physicists in Medicine) 59th Annual Meeting & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長田真由子, 上田英明, 藤井祐介, 松崎有華, 平山嵩祐, 梅垣菊男
2. 発表標題 陽子線スポットスキャンニング治療における治療計画モンテカルロ検証システムの開発
3. 学会等名 第112回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中川晴夫, 宮本直樹, 上田 英明, 横川航平, 松崎有華, 長田真由子, 梅垣菊男
2. 発表標題 動体追跡陽子線治療における線量分布評価のための腫瘍の呼吸性移動のモデリング
3. 学会等名 第112回日本医学物理学学会学術大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takao S, Matsuura T, Matsuzaki Y, Fujii Y, Fujii T, Katoh N, Shimizu S, Umegaki K, Shirato H
2. 発表標題 Dosimetric Comparison of Spot-Scanning Proton Therapy Techniques for Liver Tumors Close to the Skin Surface
3. 学会等名 AAPM 2016 58th Annual meeting and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kanehira T, Matsuura T, Takao S, Matsuzaki Y, Fujii Y, Fujii T, Miyamoto N, Inoue T, Katoh N, Shimizu S, Umegaki K, Shirato H
2. 発表標題 Simulation Study of Real-Time-Image Gating On Spot Scanning Proton Therapy for Lung Tumors
3. 学会等名 AAPM 2016 58th Annual meeting and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Shimizu S, Katoh N, Hashimoto T, Nishioka K, Yoshimura T, Takao S, Matsuura T, Miyamoto N, Umegaki K, Shirato H
2. 発表標題 Analysis of Durations and Dose Rates for Treatment of Moving Liver Tumors Using Real-Time Image Gated Spot Scanning Proton Beam Therapy
3. 学会等名 ASTRO 2016 58th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 粒子線治療システム	発明者 梅垣菊男、藤井祐介、安藤竜弥、他4名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-086846	出願年 2018年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 粒子線照射システムおよび照射計画装置	発明者 梅垣菊男、藤井祐介、藤本林太郎、宮本直樹、平山高祐、	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018- 28532	出願年 2018年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 放射線治療装置	発明者 藤井孝明、高尾聖心、宮本直樹、松浦妙子、梅垣菊男	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-047982	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

北海道大学大学院工学研究院量子理工学部門量子ビーム応用医工学研究室 http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/qsre/QSciEngjp/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮本 直樹 (Miyamoto Naoki) (00552879)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	
研究分担者	高尾 聖心 (Takao Seishin) (10614216)	北海道大学・大学病院・助教 (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	清水 伸一 (Shimizu Shinichi) (50463724)	北海道大学・医学研究院・教授 (10101)	
研究 分担者	松浦 妙子 (Matsuura Takeko) (90590266)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	