

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K08022

研究課題名（和文）深層学習を用いたinterplay効果予測による4次元放射線治療計画法の開発

研究課題名（英文）Development of four-dimensional radiotherapy planning technology using deep learning-based prediction of motion interplay

研究代表者

秋野 祐一（Akino, Yuichi）

大阪大学・大学院医学系研究科・特任助教（常勤）

研究者番号：00722323

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、呼吸性移動を伴う腫瘍を時間変化のあるX線で治療した際のinterplay効果について、臨床利用可能なシステムを開発することである。回転強度変調放射線治療の各セグメントの線量分布を深層学習により予測し、肝腫瘍の移動を考慮した線量分布の評価が可能となった。またサイバーナイフ(CK)による動体追尾照射の追尾誤差が線量分布に及ぼす影響を評価する手法を開発した。さらにCKのラスタースキャン照射や、小線源治療における実効線量率といった、照射に時間変化を伴う新しい治療法や評価法を開発した。また深層学習の技術を応用し、dual-energy CTの画像を生成するネットワークを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Interplay効果を評価した報告は多くあるが、非常に高度な技術と高性能計算機を用いた研究レベルのものが多く、臨床現場で迅速に行えるものではない。近年放射線治療のワークフローは効率化が進み、CT撮影から数日で治療開始が可能となった。しかし複雑な解析方法はこの短期間のワークフローに組み込むことが困難である。本研究ではinterplay効果の影響を評価する複数のシステムを開発した。これらは複雑な解析を行うものではなく、容易に臨床のワークフローに導入することが可能と考えられる。そのため本研究の成果は臨床において、個々の患者の腫瘍と呼吸状態に対して堅牢な治療計画を作成することに役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop a system to evaluate the interplay effects of an X-ray beam with dynamic intensity modulation on a tumor with respiratory motion. Deep learning was used to predict the dose distribution in each segment of volumetric modulated radiotherapy (VMAT). It also enabled dosimetric evaluation of the effect of the interplay between the respiratory motion of the liver tumor and the dynamic beam delivery of VMAT. We also developed a system to evaluate the interplay of the tracking errors in CyberKnife respiratory-tracking irradiation. Furthermore, we developed new treatment techniques and evaluation methods for dynamic changes in irradiation, such as raster-scanning intensity-modulated radiotherapy using the CyberKnife and effective dose rate for brachytherapy. We also developed a deep neural network model for generating dual-energy CT images.

研究分野：医学物理

キーワード：放射線治療 呼吸性移動 Interplay effects VMAT 定位放射線治療 サイバーナイフ

## 1. 研究開始当初の背景

回転強度変調放射線治療(volumetric modulated arc therapy; VMAT)は、放射線治療装置を回転させながら、同時に照射領域や照射線量率をダイナミックに変化させて放射線を照射する最新の治療法である。これにより危険臓器に照射される放射線量を減らしつつ、腫瘍には高線量を高速に照射することが可能になった。肺がんや肝臓がんは呼吸性移動を伴うため、治療ビームがダイナミックに変化する治療法ではビームと腫瘍の両方が動くことにより、シミュレーションにはない線量ムラを生じてしまう。また、同様の現象が重粒子線治療でも起こり得る。呼吸による腫瘍位置の変化やビーム上で肋骨や横隔膜との重なりが変化すると照射範囲が劇的に変化する。さらに、スキヤニング照射法ではビームと臓器の両方に時間変化があり、interplay 効果のために線量均一性が低下する。そのため現状では非常に広いマージンを設定して治療している。呼吸性移動を伴う腫瘍に対して、これらのビーム照射に時間変化を伴う治療法を用いた場合、実際に患者に投与される線量分布がシミュレーションと乖離する可能性が報告されている。しかしこの interplay 効果を商用の治療計画装置で予測することは非常に困難である。

## 2. 研究の目的

本研究では、患者の呼吸波形から、ビーム照射に時間変化を伴う治療を行った際の interplay 効果を予測するシステムの開発を目的とした。この interplay 効果を評価した報告は過去にも多くあるが、いずれも非常に高度な技術と高性能計算機を用いた研究レベルのものであり、臨床現場で迅速に行えるものではない。深層学習を用いて高速に動作するシステムを開発することにより、臨床利用が可能なレベルで呼吸性移動が及ぼす影響の評価が可能になると考えられる。

## 3. 研究の方法

### (1) VMAT の基本となるビームデータの評価

非常に複雑な線量計算を伴う VMAT の治療において、治療計画装置のビームデータを正確に作り込むことは非常に重要である。そこで、同じシリーズのリニアックを保有する 40 施設にビームデータの提供を依頼し、収集したデータから施設間のデータのばらつきを解析した。解析のために専用のソフトウェアを開発し、ビームプロファイル (OCR)、深部線量百分率 (PDD)、出力係数 (OF) について平均データを作成し、平均値からの偏差を評価した。

さらに、精度の高いビームデータモデリングを行うためには、放射線ビームの正確な測定データが必要である。そこで、特に正確な計測が難しい小照射野の測定のために開発された PTW 社製ダイオード検出器 (model 60023, model 60022)、および Standard Imaging 社製プラスチックシンチレータ W2 を用いてサイバーナイフのビームデータを計測した。ダイオード検出器 (model 60016) およびダイヤモンド線量計 (model 60019) でも測定し、補正を行った値と比較することにより、新しいダイオード検出器である model 60023 及び model 60022 の小照射野計測特性を評価した。

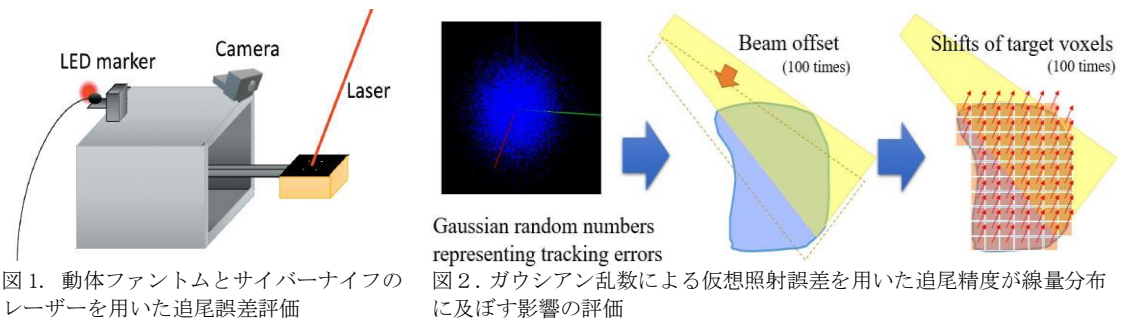
### (2) 呼吸性移動を伴う腫瘍に対する治療の影響

肺がん・肝臓がんなどは呼吸により腫瘍が動く。この腫瘍の呼吸性移動への対策には、呼吸同期照射や息止め照射、動体追尾照射などがある。動体追尾照射の精度は呼吸振幅や呼吸の周期、そして体表面におくマーカーの呼吸周期と腫瘍の移動周期の間の位相シフトなどによって影響を受けることがこれまでの研究で明らかとなった。そこで、本研究では呼吸波形が追尾精度に影響を及ぼした場合、腫瘍の線量分布にどのような影響を与えるか評価する方法を開発した。

追尾誤差の解析方法について、2 種類の方法を開発した。

1 つ目は、肝腫瘍の近傍に埋め込まれた金マーカーの呼吸性移動の位相と胸骨の位相の差を解析し、先行研究により求めた実験値より追尾誤差を求める方法である。金マーカーはしきい値処理により二値化し、正面・側方の 2 方向について画像投影することにより 3 次元位置を解析した。この処理を 4 次元 CT の各位相について行い、腫瘍の各位相における軌道を解析した。また剣状突起に関心領域を設定し、テンプレートマッチングにより各呼吸位相における位置を解析した。2 つ目は、患者の呼吸性移動を治療時のログファイルから求め、その呼吸性移動のとおり動体ファントムを動かして測定する方法である (図 1)。動体ファントムのアームに黒い紙を貼り付けた。紙には 4×4 cm の正方形の頂点に当たる位置にマーキングがあり、カメラで撮影することによりアームの位置を解析することができる。その中央に仮想ターゲットを置いて追尾照射の治療計画を作成し、放射線ではなくレーザーを照射するモードでサイバーナイフによる追尾を行い、レーザーの照射位置を動画上で解析することにより追尾誤差を求めた。

上記の 2 つの方法で求められた追尾誤差の標準偏差を求め、ShioRIS 2.0 (RADLab 社) を用いてガウシアン乱数により仮想照射誤差を発生させた。その誤差を考慮して腫瘍の位置を変位させて線量計算を行い、線量分布への影響を評価した (図 2)。



### (3) 時間変化を伴う照射技術の評価

VMATと同様に、治療ビームに時間変化がある治療法について検討した。

1つはサイバーナイフ治療を更に効率的に行うための技術開発である。サイバーナイフ G4は円形コーンのビームを多数方向から照射する装置であり、非常に高い線量集中性を実現できる一方で、アームの移動時間が治療時間の延長に大きく寄与する。サイバーナイフは動体追尾を実現できるほどの運動性能を有しているため、この性能を活かした Raster-scanning IMRT (RS-IMRT) 照射のコンセプトを考案し、その有用性について検討した。前立腺がん IMRT の治療計画を汎用リニアック用にモデリングされた治療計画装置で作成し、そのフルエンスマップと同様のビームを照射するためのシーケンスをサイバーナイフのビームで作成した(図3)。さらに治療効率を向上させるため、コーン径が大きいビームを複数照射し、RS-IMRT 照射を追加するハイブリッド法についても検討を行った(図4)。またその研究をさらに発展させ、フルエンスマップ自体を独自のアルゴリズムで最適化するシステムを開発し、治療計画全体のワークフローを完結できるシステムを開発した。

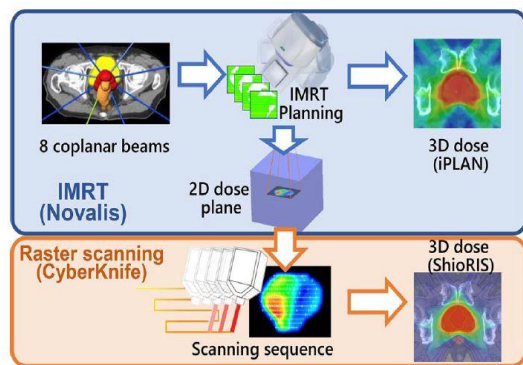


図3. RS-IMRT のコンセプト図

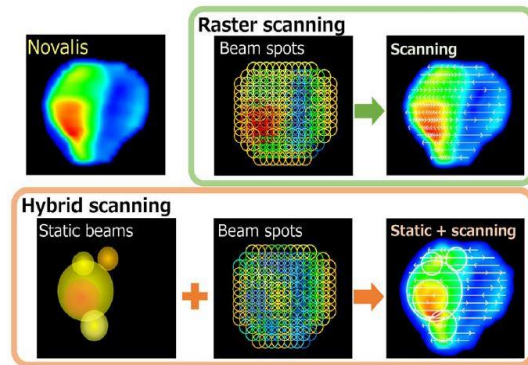


図4. ハイブリッド法による RS-IMRT の照射効率改善

外部放射線治療と大きく性質は異なるが、密封小線源治療はイリジウム線源近傍では非常に高い線量率であり、さらにイリジウム線源の減弱を考慮すると治療の時期により腫瘍や正常組織に投与される放射線の線量率は変化する。この線量率を停留点ごと、臓器のボクセルごとに計算する方法を開発し、組織が照射される実効線量率 (effective dose rate for patients; EDRp) を計算する方法を開発した(図5)。過去に子宮頸がんの放射線治療を受けた患者について、直腸の晩期有害事象の発生と EDRp に相関があるか検討を行った。

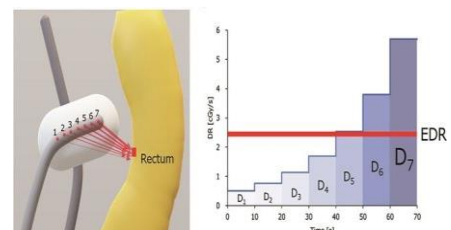


図5. 直腸の EDRp 計算

また舌がんの密封小線源治療において、サイバーナイフ RS-IMRT 照射で用いた最適化アルゴリズムと、子宮頸がん密封小線源治療で用いた線量計算の方法を組み合わせることにより、密封小線源治療における新しい最適化技術を開発した。舌がんを治療する際、下顎骨に高線量が照射されると顎骨壊死を起こす可能性がある。このリスクを低減するために舌と下顎骨の間に鉛ブロックを置くが、このブロックの影響を考慮して線量計算することはできない。そこで我々は鉛ブロックの減弱を考慮できる計算システムを開発し、さらに上述の最適化アルゴリズムを用いて鉛ブロックを考慮した最適化演算を行うことにより、優れた線量分布を実現できるシステムを開発した。

#### (4) 深層学習による評価

VMATと呼吸性移動による interplay effects を評価するためには、VMATのセグメントにおける線量分布を個別に計算する必要がある。そこで、ビームセグメントのビームレット形状と、そのビームを治療計画装置で計算させた線量分布を用いて深層学習のネットワークに学習させ、ビーム形状から線量分布を予測させるネットワークを構築した。過去に定位放射線治療を実施した8例の患者データを用いてVMATの治療計画を作成し、各方向のMLCセグメントを仮想水ファントムに照射した場合の線量分布を治療計画装置 Eclipse を用いて計算させた。計算された三次元線量分布を  $128 \times 128 \times 256$  mm の領域でトリミングし、深さ方向のボクセルサイズを2倍にして  $128 \times 128 \times 128$  のマトリックスとして保存した。同じジオメトリの三次元ボリュームを用意し、照射野範囲内は白、照射野外は黒の照射野形状の二値化ボリュームを作成し、線量分布と二値化照射野ボリュームのペアを学習させたニューラルネットワークを用いて、照射野形状から三次元線量分布を予測させる深層学習のネットワークを構築した(図6)。このネットワークを用いて、腫瘍の呼吸性移動に対する interplay effects の予測を行った。患者の肝腫瘍に対するVMAT治療の線量分布を、深層学習で予測した各セグメントの線量分布を積算して計算した(図7)。さらに呼吸性移動を加味して各セグメントにおける腫瘍位置をシフトさせて、オリジナルの線量分布からの変化を評価した。

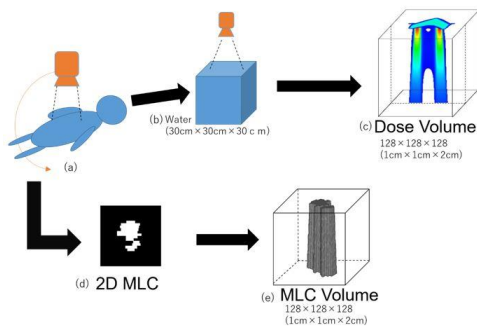


図6. 3D U-Netを学習させるための3次元線量分布およびビームレットの作成

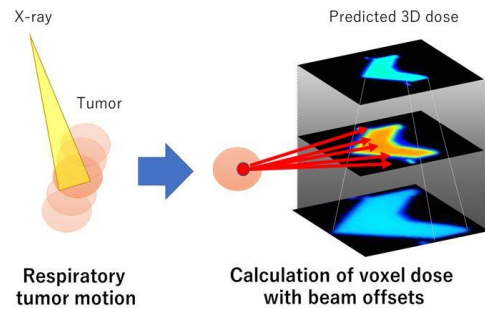


図7. 腫瘍の各ボクセルに付与する線量をシフトすることによる interplay 効果予測

また、深層学習の技術を応用した研究として、通常のCT画像からデュアルエネルギーCTで得られるような仮想単色X線画像を生成する技術を開発した。膵臓がん患者50例のデュアルエネルギーCT画像について、通常のCTに近い77keVの仮想単色X線画像(virtual monochromatic images; VMI)と、造影領域の描出が良好な60keVのVMIを作成し、77keV VMIから60keV VMIを予測する深層学習モデルを構築した。また頭頸部がん症例115例のデュアルエネルギーCTから70keVと50keVのVMIを作成し、70keV画像から50keV画像を予測するモデルを構築した。

#### 4. 研究成果

##### (1) VMATの基本となるビームデータの評価

多数施設のビームデータを評価した結果、線量降下領域におけるPDDの平均値からの線量差は1.0%未満であった。OPFデータの平均値との相対差は、すべてのエネルギーと照射野サイズでほぼ1.0%以内であった。平坦部のOCRデータについて、平均値との差の標準偏差は概ね1.0%以内であった。したがって近年のリニアックは個体間のばらつきが小さく、精度の高いビームデータモデリングが期待できることが明らかになった。

最近登場したmodel 60023およびmodel 60022のダイオードは、従来の検出器と比べて温度特性、線量率特性および小照射野特性について顕著な改善が見られており、特に小照射野においても正確な線量計測が期待できることが明らかとなった。またプラスチックシンチレータW2は小さい照射野でもチェレンコフ光の補正が十分な精度で行えることが明らかとなり、小照射野計測についても十分な精度が確認された。

##### (2) 呼吸性移動を伴う腫瘍に対する治療の影響

肝臓がん症例について腫瘍近傍の近マーカーの動きと胸骨の動きについて解析したところ、呼吸位相シフトの中央値は、前後方向(AP)で6.0%、上下方向(SI)で4.6%であった。呼吸位相シフトの影響を受けた運動追跡誤差の中央値は、AP方向で1.21mm、SI方向で0.96mmであった。ターゲットの90%をカバーする線量(D90%)の変化は、中央値の位相シフトを考慮した場合、1.1%以内であった。位相シフトの90パーセンタイルを評価すると、D90%は6.6%まで減少した。この研究により、治療計画のCTを撮影する際の4次元CTを用いて、治療計画の段階で運動追尾照射の追尾誤差を予測することが可能になった。

また、動体ファントムを用いて計測した追尾誤差は、横方向ではビームオン時間の 90%において±2mm 以内、縦方向ではビームオン時間の 90%で±3.0mm 以内、50%で±1.1mm 以内であった。PTV の 95%をカバーする線量 (D95%) が 1.8%低下した症例があったが、GTV の 99%をカバーする線量 (D99%) の変化は 1%以内であった。最大追尾誤差が大きい呼吸パターンであっても、ビームオン時間の高い割合でビームが正確に照射されれば、十分な GTV カバー率が達成可能であることが示された。

### (3) 時間変化を伴う照射技術の評価

本研究で開発したサイバーナイフによる RS-IMRT 照射法は、元にした汎用リニアックビームのデータを用いた IMRT のフルエンスを正確に再現することができた。前立腺がん 3 例について評価したところ、線量差 5%を基準とした線量誤差の平均パス率はコーンサイズ $\leq 12.5\text{mm}$ で 85%以上であった。コーンサイズ 12.5mm のハイブリッドスキニングの推定治療時間は、シーケンシャルプランのそれより平均 22%短かった。また、本研究で開発したフルエンスマップ最適化技術を用いた治療計画では、計画標的体積 (PTV) において、RS-IMRT 計画は汎用リニアックの計画と比較して体積の 2%をカバーする線量 (D2%) が高く、D98%が低かった。しかし、均一性は当施設の臨床プロトコル内であった。RS-IMRT は臨床的に受け入れ可能な治療計画を作成することができた。この技術は、従来の円形コーンを用いたサイバーナイフで、治療時間を短縮しながら優れた線量分布を達成できると期待される。

密封小線源治療について、本研究で開発した EDRp と有害事象の発生率の関係性を子宮頸癌患者 142 例について評価した。Grade1 以上の直腸合併症を有する患者では、D0.1cc-5cc の平均 EDRp が有意に高く、D0.1cc-5cc の EQD2 も高かった。D2cc の平均 EDRp、D2cc の EQD2、重喫煙、BMI を用いて多変量解析を行った。これら 4 つの変数のうち、D2cc の平均 EDRp (HR = 3.38, p = 0.004) と D2cc の EQD2 (HR = 2.59, p = 0.045) が晩期直腸合併症の独立した予測因子として浮上した。

舌がんの小線源治療では、鉛ブロックの減弱を考慮して最適化計算を行うことにより、下顎骨の D2cc は $-2.4 \pm 2.4\text{Gy}$  (範囲、 $-8.2 \sim 0.0\text{Gy}$ ) の変化が認められた。

### (4) 深層学習による評価

VMATのセグメントから線量分布を予測する3D U-Netのネットワークを構築し、その予測精度を評価した。平均絶対誤差は $0.0114 \pm 0.0113\text{Gy}$ であった。最大深、10 cm深では3%/3mmのガンマパス率が94%以上で、良好な予測結果が得られた(図8)。患者の肝腫瘍に対するVMAT治療の線量分布を、深層学習で予測した各セグメントの線量分布を積算して計算した。さらに呼吸性移動を加味して各セグメントにおける腫瘍位置をシフトさせてinterplay effectsの予測を行った。腫瘍のD98は平均で3%、最大8.3%低下した(図9)。ネットワークの学習には20時間を要したが、呼吸性移動を考慮した腫瘍の線量計算は1回あたり10分程度で完了した。この計算速度であれば、臨床例に対して様々な呼吸パラメータについてシミュレーションを複数回行うことも数十分で可能であり、臨床上の治療計画のフローの中で行うことも現実的に可能と考えられる。

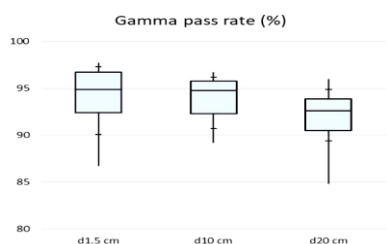


図8. 深層学習により予測した線量分布の精度

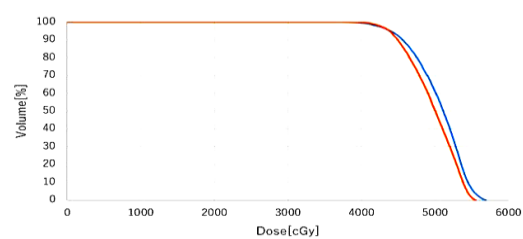


図9. Interplay効果によるターゲット線量の変化

深層学習を利用した、通常CTから仮想単色X線CTを予測するシステムについて、その予測精度を評価したところ、膵臓がんのモデルではContrast-to-Noise ratio (CNR)が単一エネルギーCT (SECT) 画像 ( $2.8 \pm 1.1$ ) と比較して、VMI ( $4.1 \pm 1.8$ ) では有意に改善した ( $p < 0.001$ )。生成された画像について2名の医師が5段階で評価したところ、VMIの平均総合画質 ( $4.1 \pm 0.6$ ) および腫瘍強調度 ( $3.6 \pm 0.6$ ) は、SECT画像 (総合画質 $3.2 \pm 0.4$ 、腫瘍強調度 $2.8 \pm 0.4$ ) に比べて有意に高かった ( $p < 0.001$ )。また頭頸部のモデルでは、U-Net、DenseNetベース、および2つのResNetベースのモデルについて検討を行った。U-NetはMAEが最も低く ( $13.32 \pm 2.20\text{HU}$ )、PSNRが最も高く ( $47.03 \pm 2.33\text{dB}$ )、SSIMが最も高かった ( $0.9965 \pm 0.0009$ )。HU評価は、ground-truthとU-Netの間で良好な一致を示した。U-Netは腫瘍のHU差の絶対値が最も小さく、 $< 5.0\text{HU}$ であった。この研究で提案されたU-Netは、確立されたDLアーキテクチャと比較して、より短時間で高精度のpVMI50keVを生成できることが示された。本手法にデュアルエネルギーCTを有しない施設でもSECT画像から低エネルギーVMIを得ることができるようになる可能性がある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Yuhei Koike, Shingo Ohira, Yuri Teraoka, Ayako Matsumi, Yasuhiro Imai, Yuichi Akino, Masayoshi Miyazaki, Satoaki Nakamura, Koji Konishi, Noboru Tanigawa, Kazuhiko Ogawa	4. 巻 17
2. 論文標題 Pseudo low-energy monochromatic imaging of head and neck cancers: Deep learning image reconstruction with dual-energy CT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Int J Comput Assist Radiol Surg	6. 最初と最後の頁 1271-1279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11548-022-02627-x	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 Sakiko Yoshioka, Yuichi Akino, Hiroya Shiomi, Takero Hirata, Naoki Kai, Kazuhiko Ogawa, Masahiko Koizumi	4. 巻 36
2. 論文標題 Dosimetric Evaluation of CyberKnife Synchrony System for Liver Tumors With Respiratory Phase Shifts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 In Vivo	6. 最初と最後の頁 2861-2868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21873/invivo.13026	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 Yuichi Akino, Hiroya Shiomi, Naoichi Higashinaka, Tomohiro Kouno, Nobuhisa Mabuchi, Fumiaki Isohashi, Yuji Seo, Kei Fujiwara, Setsuo Tamenaga, Kazuhiko Ogawa	4. 巻 43
2. 論文標題 Evaluation of Lung and Liver Tumor Dose Coverage Treated With the CyberKnife Synchrony System With Consideration of Measured Tracking Errors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Anticancer Res	6. 最初と最後の頁 231-238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21873/anticancerres.16154	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 Yuichi Akino, Hiroya Shiomi, Nobuhisa Mabuchi, Norihisa Masai, Ryoong-Jin Oh, Kazuhiko Ogawa	4. 巻 43
2. 論文標題 Optimization of Fluence Map for CyberKnife Raster Scanning Intensity Modulated Radiotherapy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Anticancer Res	6. 最初と最後の頁 1637-1642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21873/anticancerres.16314	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 Isohashi F, Akino Y, Matsumoto Y, Suzuki O, Seo Y, Tamari K, Sumida I, Sawada K, Ueda Y, Kobayashi E, Tomimatsu T, Nakanishi E, Nishi T, Kimura T, Ogawa K	4. 巻 62
2. 論文標題 Dose rate in the highest irradiation area of the rectum correlates with late rectal complications in patients treated with high-dose-rate computed tomography-based image-guided brachytherapy for cervical cancer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 494-501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rrab023.	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 Ohira S, Koike Y, Akino Y, Kanayama N, Wada K, Ueda Y, Masaoka A, Washio H, Miyazaki M, Koizumi M, Ogawa K, Teshima T	4. 巻 85
2. 論文標題 Improvement of image quality for pancreatic cancer using deep learning-generated virtual monochromatic images: Comparison with single-energy computed tomography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 8-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejmp.2021.03.035.	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 Akino Y, Das IJ, Fujiwara M, Kaneko A, Masutani T, Mizuno H, Isohashi F, Suzuki O, Seo Y, Tamari K, Ogawa K	4. 巻 62
2. 論文標題 Characteristics of microSilicon diode detector for electron beam dosimetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 1130-1138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rrab085	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 Seo Y, Tamari K, Takahashi Y, Minami K, Tatekawa S, Isohashi F, Suzuki O, Akino Y, Ogawa K.	4. 巻 98
2. 論文標題 Poly (ADP-ribose) polymerase inhibitors sensitize cancer cells to hypofractionated radiotherapy through altered selection of DNA double-strand break repair pathways	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Radiation Biology	6. 最初と最後の頁 1222-1234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09553002.2022.2020357.	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 Akino Yuichi, Fujiwara Masateru, Okamura Keita, Shiomi Hiroya, Mizuno Hirokazu, Isohashi Fumiaki, Suzuki Osamu, Seo Yuji, Tamari Keisuke, Ogawa Kazuhiko	4. 巻 61
2. 論文標題 Characterization of a microSilicon diode detector for small-field photon beam dosimetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 410 ~ 418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rraa010	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 GOTO HIRONAO, MIZUNO HIROKAZU, AKINO YUICHI, ISONO MASARU, TANAKA YOSHIHIRO, MASAI NORIHISA, YAMAMOTO TOSHIJIRO, KOIZUMI MASAHIKO	4. 巻 34
2. 論文標題 Evaluation of the Differences Between Measurements in Multiple Institutions and Calculation Modeled by Representative Beam Data in Prostate VMAT Plan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 In Vivo	6. 最初と最後の頁 1503 ~ 1509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21873/invivo.11937	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 Fukao Mari, Okamura Keita, Sabu Shotaro, Akino Yuichi, Arimura Takehiro, Inoue Shinichi, Kado Ryoko, Seo Yuji	4. 巻 74
2. 論文標題 Repositioning accuracy of a novel thermoplastic mask for head and neck cancer radiotherapy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 92 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejmp.2020.05.005	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 Tanaka Yoshihiro, Mizuno Hirokazu, Akino Yuichi, Isono Masaru, Masai Norihisa, Uta Erika, Yamamoto Toshihiro	4. 巻 43
2. 論文標題 Collection and analysis of photon beam data for Varian C-series linear accelerators: a potential reference beam data set	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical and Engineering Sciences in Medicine	6. 最初と最後の頁 889 ~ 901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13246-020-00885-0	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 Akino Yuichi, Maruoka Shintaro, Yano Katsuyuki, Abe Hiroshi, Isohashi Fumiaki, Seo Yuji, Tamari Keisuke, Hirata Takero, Kawakami Manabu, Nakae Yoshiki, Tanaka Yoshihiro, Ogawa Kazuhiko	4. 巻 61
2. 論文標題 Commissioning of total body irradiation using plastic bead bags	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 959 ~ 968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rraa072	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 Akino Yuichi, Okamura Keita, Das Indra J., Isohashi Fumiaki, Seo Yuji, Tamari Keisuke, Hirata Takero, Hayashi Kazuhiko, Inoue Shinichi, Ogawa Kazuhiko	4. 巻 48
2. 論文標題 Technical Note: Characteristics of a microSilicon X shielded diode detector for photon beam dosimetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 2004-2009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mp.14639	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 該当する

1. 著者名 Shiomi Hiroya, Akino Yuichi, Sumida Iori, Masai Norihisa, Oh Ryoong-Jin, Ogawa Kazuhiko	4. 巻 62
2. 論文標題 Development of raster scanning IMRT using a robotic radiosurgery system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 364 ~ 373
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rraa136	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 Akino Yuichi, Shiomi Hiroya, Isohashi Fumiaki, Suzuki Osamu, Seo Yuji, Tamari Keisuke, Hirata Takero, Mizuno Hirokazu, Ogawa Kazuhiko	4. 巻 62
2. 論文標題 Correction of lateral response artifacts from flatbed scanners for dual-channel radiochromic film dosimetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 319 ~ 328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rraa124	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 Akino Yuichi, Shioni Hiroya, Tsujimoto Tomomi, Hamatani Noriaki, Hirata Takero, Oda Michio, Takeshita Ami, Shimamoto Hiroaki, Ogawa Kazuhiko, Murakami Shumei	4. 巻 41
2. 論文標題 Inverse planning optimization with lead block effectively suppresses dose to the mandible in high-dose-rate brachytherapy for tongue cancer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Radiology	6. 最初と最後の頁 1290 ~ 1297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11604-023-01451-w	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 Okamura Keita, Akino Yuichi, Inoue Shinichi, Isohashi Fumiaki, Seo Yuji, Tamari Keisuke, Hirata Takero, Hayashi Kazuhiko, Fumimoto Yasutoshi, Ogawa Kazuhiko	4. 巻 156
2. 論文標題 Evaluation of calibration methods of Exradin W2 plastic scintillation detector for CyberKnife small-field dosimetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Radiation Measurements	6. 最初と最後の頁 106821
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radmeas.2022.106821	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4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Akino Y, Isohashi F, Arimura T, Seo Y, Tamari K, Hirata T, Hayashi K, Ogawa K
2. 発表標題 Development of reference plan-based verification system for intracavitary brachytherapy for uterine cervical cancer
3. 学会等名 63rd AAPM Annual Meeting & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mizuno R, Akino Y, Koizumi M
2. 発表標題 Evaluation of interplay effects of VMAT for liver tumors by prediction of dose distribution using deep learning
3. 学会等名 The 5th International Cancer Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuichi Akino, Masateru Fujiwara, Akari Kaneko, Takashi Masutani, Hirokazu Mizuno, Fumiaki Isohashi, Osamu Suzuki, Yuji Seo, Keisuke Tamari, Kazuhiko Ogawa
2. 発表標題 Characterization of microSilicon diode detector for electron beam dosimetry
3. 学会等名 第119回 日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichi Akino, Osamu Suzuki, Hiroya Shiomi, Fumiaki Isohashi, Yuji Seo, Keisuke Tamari, Takero Hirata, Kazuhiko Ogawa
2. 発表標題 Evaluation of respiratory phase shifts between lung tumor and external marker motions using a 320-slice dynamic volume 4D-CT
3. 学会等名 2020 Joint AAPM COMP Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

水野亮太. Evaluation of interplay effects of VMAT for liver tumors by prediction of dose distribution using deep learning. 大阪大学大学院医学系研究科保健学専攻 修士論文. 2022/1.

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------