

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82606

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K15613

研究課題名（和文）チェレンコフ光を用いたリアルタイム放射線治療精度評価システムの構築

研究課題名（英文）Development of real time monitoring system of radiotherapy accuracy by Cherenkov emission

研究代表者

岡本 裕之 (Okamoto, Hiroyuki)

国立研究開発法人国立がん研究センター・中央病院・医学物理士

研究者番号：90595729

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）：本研究では放射線照射により発生するチェレンコフ光を用いて、放射線治療精度をリアルタイムに評価可能とするシステムを構築する。チェレンコフ光検出器にはC-dose camera (OptiDose社)を用いカメラに内蔵されたシンチレータで散乱線を検出し、トリガー信号として信号雑音比の高い画像収集が可能である。この方法により比較的明るい治療室の状況でもチェレンコフ光を観測できた。従来から用いられている放射線検出器フィルムと比較し、ほぼ似た強度分布を取得できた。また照射MUとの直線性も確認でき、線量情報を評価することが可能であることが示せた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来では放射線照射中の体表面の線量を計測する場合には皮膚表面に放射線に感度を持つフィルムや熱ルミネッセンス線量計、ガラス線量計などを貼付する必要があるが、照射中のチェレンコフ光を観測することにより非侵襲的に表面線量を評価することが可能となった。この方法が確立すれば、患者の負担、線量計読み出しのための後処理作業を減らすことができる。品質管理ツールにおいては、従来フィルムで照射位置を評価していたが、チェレンコフ光を用いることで照射位置のみならず線量情報、放射線のエネルギーも評価できる。またすべて画像処理で結果を解析するため、フィルムなどの消耗品も減らすことができる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a real time monitoring system to evaluate radiotherapy accuracy using Cherenkov emission generated by irradiation. The Cherenkov emission detector is a C-dose camera (OptiDose, Inc.), which equips a scintillator built into the camera to detect scattered radiation and images with a high signal-to-noise ratio as a trigger signal can be obtained. By using this method, Cherenkov emission could be observed even in relatively bright treatment rooms. Comparison with conventional radiation detector, radiochromic film was also performed, and the intensity distribution was almost similar to that of the film. The linearity with the irradiation MU was confirmed, and it was demonstrated that it is possible to perform dosimetric assessment.

研究分野：放射線物理

キーワード：放射線治療 品質管理 チェレンコフ光 フィルム

1. 研究開始当初の背景

放射線照射中の標的からは可視光領域の光が発生する。これはチェレンコフ光と呼ばれる現象であり微弱な光であるため人間の目や通常のカメラでは確認することができない。通常は ICCD とよばれる高感度カメラが用いられる [1, 2]。このカメラは放射線治療装置から得られるビームパルスを送り信号として用い、信号雑音比の高い画像収集が可能である。一般的な ICCD カメラは高額でありケーブルを通してのトリガー信号が必要なため取り扱いなども煩雑で主に基礎的な物理実験で利用されてきた。今回、散乱線をトリガー信号に用いたカメラを用いることで、放射線治療室でのチェレンコフ光の観測を目的とした。このチェレンコフ光を放射線治療の品質管理等で用いることで、リアルタイムに放射線照射位置および線量情報を評価することができる。と期待できる。

2. 研究の目的

放射線治療は患者自身の体型変化や呼吸性移動などの腫瘍位置の不確かさを考慮し、照射範囲を設定し治療を行う。しかしながら、現在の放射線治療では放射線照射中にリアルタイムに治療精度をモニタリングすることができていない問題がある。本研究の目指すべき目標は、これまで放射線治療への試みが十分にされていなかった治療部位から発生するチェレンコフ放射を観測することにより、治療中の治療精度をリアルタイムにモニタリングし治療変化を効率よく評価できるシステムを構築することである。そこで、まずは治療室内でのチェレンコフ光の基礎的な物理的特性を明らかにし、品質管理等に利用できるかどうかを評価することを目的とする。

3. 研究の方法

チェレンコフ光の発生原理を説明する。図 1a に示すように屈折率 n の媒質中の光の速さは c/n で表される。高速の荷電粒子が媒質中を進むと、光の速さ (c/n) を超えた場合に進行方向 θ 方向にチェレンコフ放射が生成される。例えば、水の屈折率は 1.33 であるが、光速の 0.75 倍を超えると、 θ 方向にチェレンコフ光が放射される。この時のエネルギーは 0.264 MeV である。通常の放射線治療で使用する X 線のエネルギーは 4 から 15 MeV であるためすべての治療条件で照射部位からチェレンコフ光が放射される。図 1b に示すように放出されるチェレンコフ光は、連続スペクトルとなる。チェレンコフ光検出器には C-dose camera (OptiDose 社) を用いカメラに内蔵されたシンチレータで散乱線を検出し、トリガー信号として信号雑音比の高い画像収集が可能である。この方法により比較的明るい治療室の状況でもチェレンコフ光を観測できる。次に検証した項目を示す。

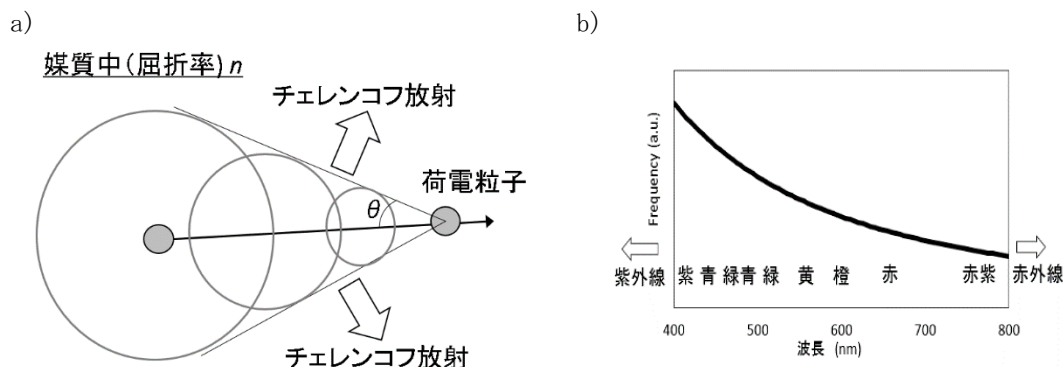


図 1. チェレンコフ光の放出角度とスペクトル

直線性と再現性

図 2 に示すように放射線治療装置 TrueBeam (Varian 社) および CyberKnife (Accuray Inc.) において、チェレンコフ光カメラを設置し、照射 MU を変えた場合のチェレンコフ光の強度変化を調査した。また、同一照射条件下にて再現性を評価した。

角度依存性と線量との関係性

また、図 2b に示すように CyberKnife にてファントム表面から様々な角度にチェレンコフ光カメラを設置しチェレンコフ光強度の変化を評価した。また比較対象として固体ファントム (タフウォータ, 京都科学社製) の上にラジオクロミックフィルムを設置し表面線量との比較を行った。なお、計測カメラは固体ファントムに対して斜めから計測しているため、解析においてはチェッカーボードを用いてアフィン変換している。図 3 に変換後のチェレンコフ光の強度分布を示す。変換後においては視点がファントム正面に変更されている。

a)



b)

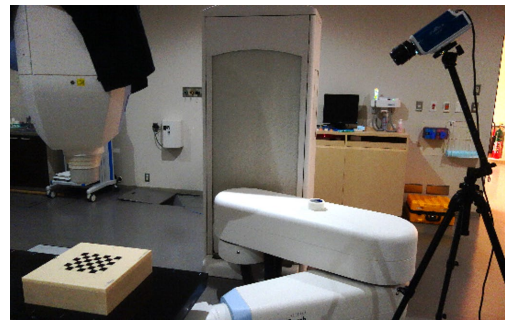
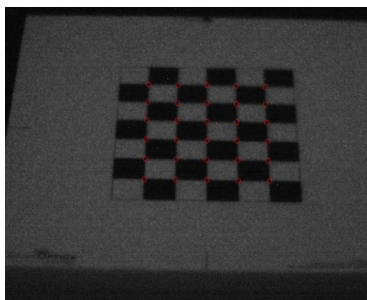


図 2. a) TrueBam および b) CyberKnife でのチェレンコフ光の測定の様子。
アフィン変換用にチェッカーボードを利用。

a)



b)

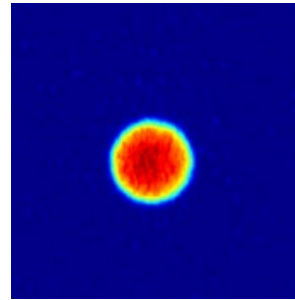
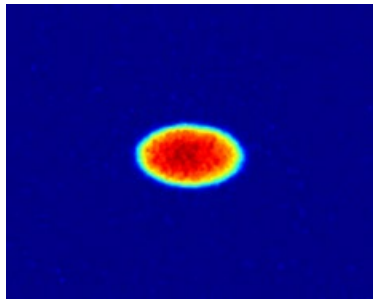
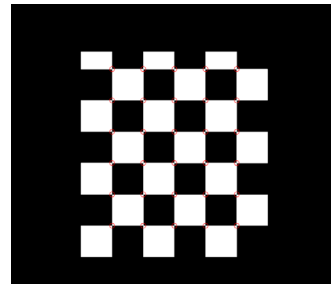


図 3. チェッカーボードを用いた撮影視点の変更。
CyberKnife のチェレンコフ光をアフィン変換し正面からの視点に変換。

放射線治療精度評価用品質管理ツールの開発

放射線治療装置の精度管理の 1 つに画像照合系の座標と放射線照射系の座標の一致性を確認する点検方法がある [3, 4]。一般的な方法は、治療室内にあるレーザを介して、照射系の座標中心と照合座標系の中心の一致性を確認する。前者の確認方法としては、スターショットや Winston-Lutz 法があり、後者の確認方法としては、金属球が内蔵されているキューブ型のファントムをレーザに合わせ設置し、照合を行うことで中心位置を確認する。両者がレーザを介して一致していれば両座標系は一致している。このように従来の方法は複数のプロセスが伴うため煩雑である。そこで本研究ではチェレンコフ光を用いて、1つのファントムで両試験が行える精度管理ツールを開発する。チェレンコフ光を利用することにより照射位置精度を画像解析から評価できる。

4. 研究成果

直線性と再現性

図 4 にチェレンコフ光と照射 MU との関係性を示す。図に示す通り、直線性 ($R^2=0.9999$) を示し、信号飽和などの影響は見られない。直線性が良好であるため、ある 1 つの照射条件にて線量を値付けすることにより、任意の条件で線量を計測することが可能である。

チェレンコフ光の再現性の結果を表 1 に示す。再現性は治療室の明るさを 2 パターンにして評価した。結果、おおよそ 1%程度であり、治療室の明るさの影響は受けにくい。通常の電離箱を用いた線量計測では再現性はおおよそ 0.05%であることを考えるとややチェレンコフ光では、

ばらつきが生じている。

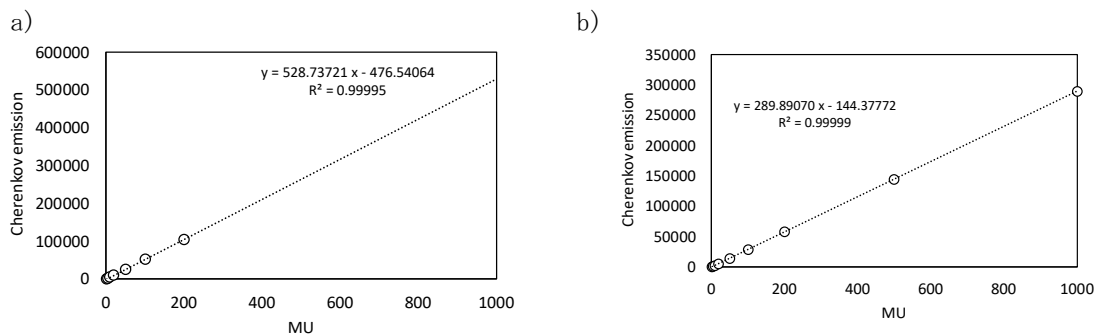


図 4. チェレンコフ光の直線性. a) 明るい部屋と b) 暗い部屋. 治療室内の明るさを調整

表 1. CyberKnife でのチェレンコフ光の再現性. 同一条件を 5 回計測. SD: 標準偏差

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均値	変動係数
明るい部屋	52756	51701	52099	52006	53166	52345	1.1%
暗い部屋	53433	54217	53098	53166	53042	53391	0.9%

角度依存性と線量との関係性

図 5 に CyberKnife にて様々な角度で計測したチェレンコフ光のプロファイルとラジオクロミックフィルムで計測した表面線量のプロファイルを示す. 照射野サイズは $\Phi 6$ cm である. 中心の値で規格化している. 角度はファンムの表面からの角度で表し, 得られたチェレンコフ光の強度をチェッカーボードを用いてアフィン変換している. 角度によってプロファイルに若干の違いは見られるがほぼ似たプロファイル形状を示している. またフィルムと比較した場合は裾野付近で違いは見られるが照射野内の形状および照射位置についてはほぼ同等であった.

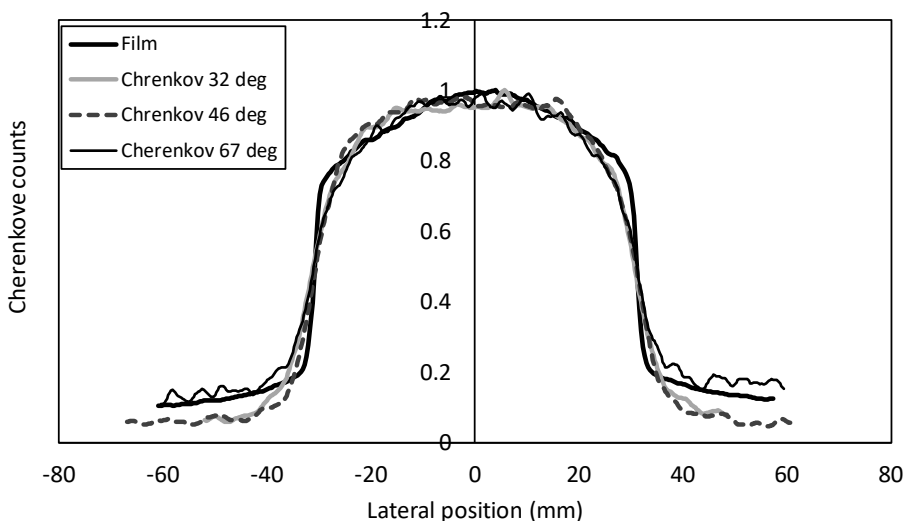


図 5. CyberKnife でのチェレンコフ光の強度. 様々な角度でのチェレンコフ光のプロファイル.

放射線治療精度評価用品質管理ツールの開発

図 6 にチェレンコフ光を用いた放射線治療精度評価用品質管理ツールを示す. チェレンコフ光の観測面として 4 方向に面を設け, 格子上的位置をもとにアフィン変換する. ガントリ 0 度, 90 度から照射することにより入射面, 射出面のチェレンコフ光を観測することができる. 本研究ではリアルタイムでの解析を目的としているため, 収集した画像は図 7 に示すように専用の解析ソフトを通して照射位置精度の評価, 入射面と射出面のチェレンコフ光の強度を評価できる.

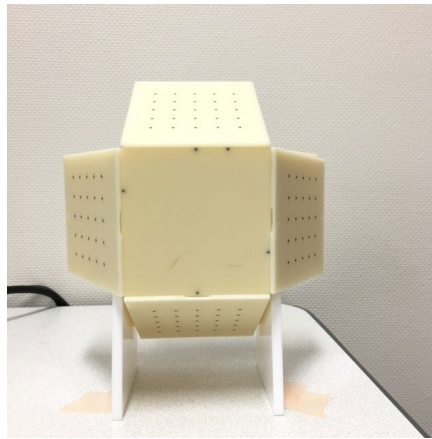


図 6. チェレンコフ光を用いた放射線治療精度評価用品質管理ツール. ファントムの内部に金属球が内蔵され、画像照合可能である.

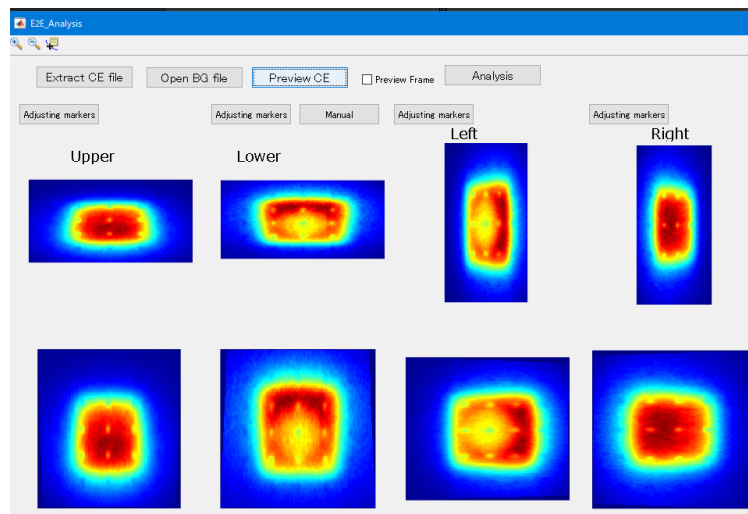


図 7. チェレンコフ光を用いた放射線治療精度評価用品質管理ツールの解析例.

従来では放射線照射中の体表面の線量を計測する場合には皮膚表面に放射線に感度を持つフィルムや熱ルミネッセンス線量計、ガラス線量計などを貼付する必要があるが、照射中のチェレンコフ光を観測することにより非侵襲的に表面線量を評価することが可能となった。この方法が確立すれば、患者の負担、線量計読み出しのための後処理作業を減らすことができる。品質管理ツールにおいては、従来フィルムで照射位置を評価していたが、チェレンコフ光を用いることで照射位置のみならず線量情報、放射線のエネルギーも評価することができる。またすべて画像処理で結果を解析するため、フィルムなどの消耗品も減らすことができる。

引用文献

1. Jarvis LA, Zhang R, Gladstone DJ, et al., Cherenkov video imaging allows for the first visualization of radiation therapy in real time, *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2014 Jul 1;89(3):615-22. doi: 10.1016/j.ijrobp.2014.01.046.
2. Andreozzi JM, Zhang R, Glaser AK, et al., Camera selection for real-time in vivo radiation treatment verification systems using Cherenkov imaging, *Med Phys.* 2015 Feb;42(2):994-1004. doi: 10.1118/1.4906249.
3. 画像誘導放射線治療の臨床施行のためのガイドライン 2019, 日本放射線腫瘍学会, 2019/5/24
4. 岡本 裕之 (監修), 黒岡 将彦, 宮浦 和徳, 脇田 明尚, 遠山 尚紀, 熊崎 祐 (編著), 詳説放射線治療の精度管理と測定技術—高精度放射線治療に対応した実践 Q&A, 中外医学社, 2012/11/20

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okamoto H, Murakami N, Isohashi I, Kasamatsu T, Hasumi Y, Iijima K, Nishioka S, Nakamura S, Nakamura M, Nishio T, Igaki H, Nakayama Y, Itami J, Ishikura S, Nishimura Y, Toita T Satoshi Ishikura, Yasumasa Nishimura, Takafumi Toita	4. 巻 14
2. 論文標題 Dummy-run for standardizing plan quality of intensity-modulated radiotherapy for postoperative uterine cervical cancer: Japan Clinical Oncology Group study (JCOG1402)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Radiation Oncology	6. 最初と最後の頁 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13014-019-1340-y	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 Okamoto H, Nishioka S, Iijima K, Nakamura S, Sakasai T, Miura Y, Takemori M, Nakayama H, Morishita Y, Shimizu M, Abe Y, Igaki H, Nakayama Y, Itami J	4. 巻 60(1)
2. 論文標題 Monte Carlo modeling of a 60Co MRI-guided radiotherapy system on Geant4 and experimental verification of dose calculation under a magnetic field of 0.35 T	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 116, 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rry087	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 Okamoto H, Iijima K, Chiba T, Takemori M, Nakayama H, Fujii K, Kon M, Mikasa S, Nakaichi T, Urago Y, Aikawa A, Katsuta S, Nakamura S, Igaki H	4. 巻 1
2. 論文標題 Technical note: Analysis of brachytherapy source movement by high-speed camera	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mp.15601.	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡本裕之
2. 発表標題 チェレンコフ光を用いた新たな品質管理への期待
3. 学会等名 第56回 臨床医学物理研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okamoto H, Sofue T, Murakami H, Kosaka M, Hamada M, Takasou K, Takemori M, Nakayama H, Kaga K, Kuwahara J, Chiba T, Iijima K, Nishioka S, Nakamura S, Itami J
2. 発表標題 Superficial dosimetry by Cherenkov emission in comparison to film dosimetry
3. 学会等名 The 121 th Japan Society of Medical Physics meeting
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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