

ポリマーゲル線量計とX線CTを用いた TomoTherapy 吸収線量の測定

○近藤 貴裕¹⁾、林 慎一郎²⁾、笛吹 修治²⁾、古志 和信³⁾、山根 明哲³⁾、小畑 慶己³⁾、姫野 敬³⁾、
富永 孝宏²⁾

1) 広島和恒会 ふたば病院、2) 広島国際大学保健医療学部 診療放射線学科、
3) 独立行政法人国立病院機構 呉医療センター・放射線科

【目的・方法】

ポリマーゲル線量計は、ラジカル重合反応を利用した線量計であり、近年行われている強度変調放射線治療や定位放射線治療などの高精度放射線治療における3次元治療計画のQA・QCへの応用が期待されている。

本研究では吸収線量 (Gy) -CT 値応答特性から TomoTherapy による吸収線量分布の測定と、ポリマーゲル線量計に用いる容器の材質の違いによる影響の評価を行った。

使用したポリマーゲル線量計は蒸留水、ゲル化剤 (ゼラチン)、ビニルモノマー (アクリルアミド)、架橋剤 (N, N'-メチレンビスアクリルアミド)、脱酸素剤 (Tetrakis Hydroxymethyl Phosphonium Chloride (THPC)) から成る、通称 PAGAT ポリマーゲルを使用した。そして、直径4 cmで長さ10 cmのガラスおよびPET製バイアル容器にポリマーゲルを封入した。長軸方向3 cmの範囲に、ポリマーゲル線量計の直径全体を覆う直径5 cmの PTV を放射線治療計画で策定し、TomoTherapy 装置にて6 MV X線を3から9 Gyをヘリカル照射した。照射1日後に、X線CT装置にてポリマーゲル線量計の吸収線量分布の評価を行った。

【結果・考察】

PET 容器を用いて測定したCT値の変化量を、特性曲線を用いて吸収線量に変換した吸収線量分布を Figure1. に示す。

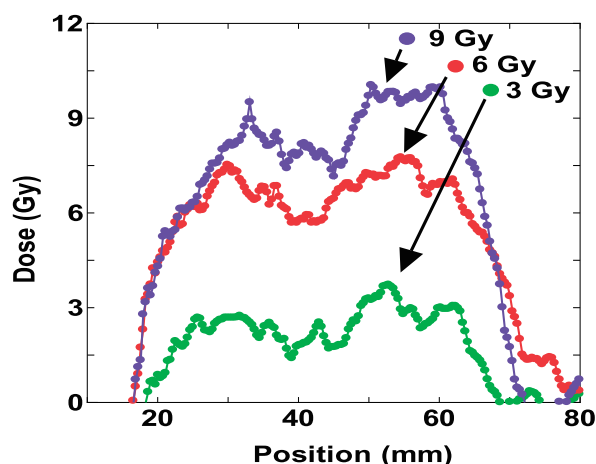


Figure1. 各線量における吸収線量分布

吸収線量ごとにCT値の差は生じたが、PAGAT ポリマーゲル線量計は吸収線量に伴うCT値の変化自体が非常に小さく、SDが大きい。そのため、平坦でない吸収線量分布を示したと思われる。

次にポリマーゲル線量計に用いる容器の材質が異なる場合のCT値分布の比較を Figure2. に示す。

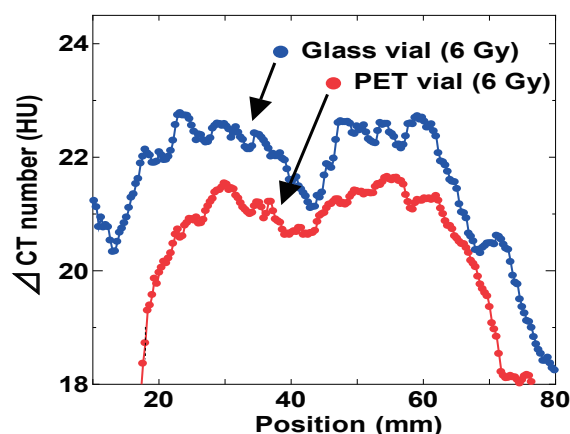


Figure2. 容器の材質による影響

それぞれの容器のポリマーゲル線量計は、吸収線量が6 Gyのもので比較した。X線CTを用いた場合、容器の形状や大きさにもよるが、ガラスバイアルはPETバイアルよりも、強いアーチファクトを生じやすい。特に比較的容器からの距離が近い底側や周辺部からのアーチファクトにより吸収線量分布が乱れ、精度が悪くなると考えられる。そのためX線CTを用いる場合は、ガラス容器よりPET容器を用いる方が良いと考えられる。しかし、PET容器を用いる場合は、容器周辺などからの酸素透過に注意する必要がある。

以上の結果から、X線CTによる測定では容器によってはアーチファクトが増加するため、容器の材質、形状、大きさなどを考慮する必要がある。また、吸収線量の増加に伴う電子密度の変化が小さいため信号雑音比が小さい。これを改善するために、反応量や密度変化の大きな新たなポリマーゲル線量計の開発や、アーチファクトによる影響の低減のためのキャリブレーション法の検討が求められる。また、フィルタリング補正による改善も併せて、今後の研究で検討していく予定である。

○秋里 琢馬¹⁾、吉村 亮¹⁾、林 慎一郎¹⁾、笛吹 修治¹⁾、近藤 貴裕²⁾、古志 和信³⁾、山根 明哲³⁾、小畑 慶己³⁾、姫野 敬³⁾、富永 孝宏¹⁾

1) 広島国際大学保健医療学部診療放射線学科、2) 広島和恒会ふたば病院、
3) 独立行政法人国立病院機構呉医療センター・放射線科

【背景】現在の放射線治療は腫瘍部に多くの線量を与え正常細胞にはなるべく低い線量にするため、IMRTや粒子線治療など腫瘍部のみに照射を行う高精度な照射法が日々進歩してきている。それにともない線量精度や位置精度など高い精度の検証方法が求められている。その検証方法の一つとして、複雑な三次元線量分布の直接評価が可能なポリマーゲル三次元線量計が注目されてきている。

【目的】本研究では、トモセラピー装置による吸収線量分布のMRIとポリマーゲル線量計を用いて評価する。ポリマーゲル線量計にトモセラピー装置で回転照射を行い、軸内線量分布の測定した値と治療計画装置で求められた値を比較する。

【方法】本研究で使用したポリマーゲル線量計は積算性のよいPAGATといわれる標準的な線量計を使用した。校正曲線作成用には校正用ガラス試験管(φ 18 mm)を使用した。吸収線量分布測定には校正用ガラス試験管よりも少し太いガラスバイアル(φ 40 mm)を使用した。

校正曲線用の資料はタフウォーターファントムに校正用試験管をはさみ照射を行った。吸収線量分布の測定に使用したファントムは10 cm角のアクリルブロックにガラスバイアルを差し込んで照射を行った。照射装置はトモセラピー装置にて3, 6, 9, 12Gyをそれぞれのファントムに照射をした。照射されたゲルの吸収線量分布を評価するため1.5TのMRIを用いて緩和時間 T_2 を測定した。2エコー時間 (TE_1 、 TE_2) における信号強度 (S_1 、 S_2) から、下の式を用いて緩和速度 R_2 値を求めた。

$$R_2 = (1/TE_2 - TE_1) \ln(S_1/S_2)$$

【結果】図1に校正用の試験管から得られた校正曲線を示す。3, 6, 9, 12Gyを均等に照射すると、吸収線量が増加するにつれて濃度が濃くなった。試験管中央付近でMRIを用いて測定すると吸収線量に対する R_2 値は直線性の良い結果が得られた。この校正曲線を用いて軸内吸収線量分布の評価を行った。

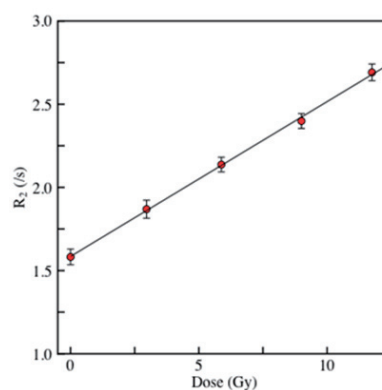


図1 吸収線量- R_2 応答特性

図2にガラスバイアルを用いて求められた軸位吸収線量分布の結果を示す(丸印)。実線は治療計画装置の結果を示している。これら軸内吸収線量分布と治療計画装置の分布を比較すると、軸内吸収線量分布と治療計画装置の結果の形状はほぼ一致している。しかし、9Gyでは線量の過大評価を示した。更に低線量(3Gy)ではデータのバラツキが大きかった。

今後の課題とされる事項は、3Gyでバラツキが大きくなったのは標準的な感度のPAGATを使用したためと考えられ、我々が現在開発している高感度ゲルを用いた検証を行う予定である。9Gyで軸内線量分布の過大評価を示したのは校正用の試験管と軸内線量分布のガラスバイアルの形状やサイズの違いが影響している可能性が考えられるので、校正方法の改良を検討している。また、実際の臨床を想定したより複雑な形状での線量分布の評価を行う予定である。

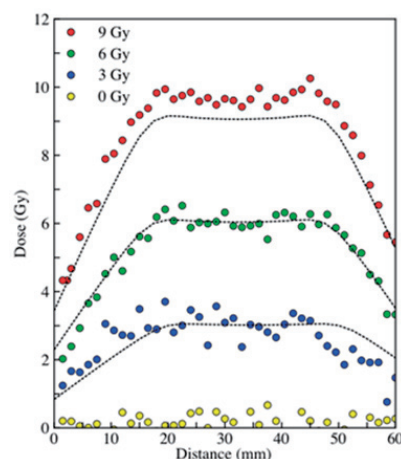


図2 軸内吸収線量分布

○弘中 杏奈¹⁾、瀬尾 貴志¹⁾、林 慎一郎¹⁾、川村 拓²⁾、笛吹 修治¹⁾、富永 孝宏¹⁾

1) 広島国際大学保健医療学部診療放射線学科、2) 茨城県立医療大学保健医療学部放射線技術学科

【背景】現在、放射線治療はIMRTなど高精度となってきた。これに伴って、より高い線量精度・位置精度の検証が求められている。複雑な3次元線量分布を直接評価するための一つの方法として、ポリマーゲル3次元線量計が注目を集めている。

【目的】今回の実験の目的は、「ポリマーゲルの長期保存の影響」を調べる事である。

我々はゲルを作製後、冷蔵保存し、照射施設に郵送したり、持参している。そのため、予定通りの日に照射ができない事もあり、その場合は冷蔵保存し、照射を行っている。この保存期間が、ゲル線量計の緩和速度 R_2 ($1/T_2$) に与える影響について調べた。

【方法】まず、ゲルを作製し、冷蔵庫(4℃)で保存する。それを、1本ずつ、翌日、1週間後、2週間後と1週間おきに10 MVのX線で10 Gyずつ順次照射し、これらを冷蔵庫で保存した。これを2カ月間にわたって行い、MRIで撮像し、 R_2 値への影響を調べた。

ゲルは標準 PAGAT ゲルと増感剤として塩化マグネシウムを添加した PAGAT ゲルを用い、これを10 mlの試験管に各9本ずつ作製した。

【結果】結果を下の図1、図2に示す。



図1 標準 PAGAT ゲル



図2 増感剤を添加した PAGAT ゲル

それぞれ、左から順に未照射のもの、作成した翌日に照射したもの、次から1週間おきに7週間にかけて照射したものである。照射されたところが白く反応してい

るが、反応していない透明の部分は試験管口から浸透してきた酸素の影響であると考えられる。撮像は白く反応したところができるだけ多く含まれるように底から約2 cmの位置で行った。これらの測定結果を図3に示す。

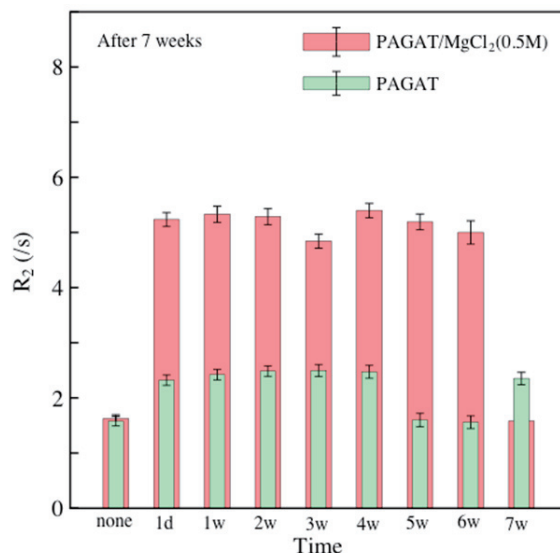


図3 反応性 (R_2) の経時変化

ピンクのグラフが増感剤として塩化マグネシウムを添加した PAGAT ゲルで、緑のグラフが標準 PAGAT ゲルの R_2 の経時変化である。

両者のゲルの R_2 値を比較してみると、増感剤を添加した方が標準 PAGAT ゲルと比較して3、4倍高い値が得られた。また、全体を比較してみると、どちらも2カ月間にわたり、ほぼ安定した値が得られた。少し値が低く、未照射の値とほぼ同じ値になっているところがあるが、これは試験管口から浸透してきた酸素の影響により、反応が生じなかったと考えられる。しかし、標準 PAGAT ゲルの7週間目を見ればわかるように、酸素の影響がなければ反応が生じている。これにより、ゲルは酸素の影響がなければ、2カ月間保存する事が可能であることがわかった。

以上より、PAGAT ゲルは増感剤の添加の有無の関係なく、酸素の浸透を防ぐ事が出来れば、長期の保存は可能であると示された。

今後の課題として、今回は、冷蔵庫で保存したが、これを常温で保存することにより、 R_2 値にどう影響が出るのかを調べる。また、保存期間を半年、1年とより長期にすることによる影響や、照射直前に脱酸素剤を添加による酸素浸透の軽減、及び、酸素の浸透を防ぐ容器の改良などがあげられる。

○川原 美咲¹⁾、西谷 祐紀¹⁾、林 慎一郎¹⁾、笛吹 修治¹⁾、片平 慶²⁾、富永 孝宏¹⁾

1) 広島国際大学保健医療学部診療放射線学科、2) 兵庫県立粒子線医療センター

【背景】近年、機器の精度の向上に伴い、IMRT や IGRT、粒子線治療などの高度放射線治療分野の発展には目覚ましいものがある。治療技術の高精度化に伴い、より精度の高い QA/QC が求められるようになってきている。それに伴い線量分布を直接3次元的に評価することが可能なポリマーゲル線量計が注目を集めている。

ポリマーゲル線量計とは、放射線の照射によりゲル中でビニルモノマーがラジカル重合反応を起こすことを利用したもので、線量分布を3次元的に評価できる線量計である。

【目的】本研究ではポリマーゲル線量計に陽子線を照射し、その吸収線量分布を、MRI を用いて評価した。これまでの小ファントム (30mL 試験管) の実験から、ポリマーゲル線量計の陽子線に対する十分な感度および積算性が確認されている。¹⁾

今後の臨床応用の観点からより大きなファントム (1L) を用いて、陽子線の直交2門照射に対するポリマーゲル線量計の感度および積算性の検証を行う。

【方法】本研究では、蒸留水にゲル化剤 (ゼラチン)、モノマー (アクリルアミド)、架橋剤 (ビスアクリルアミド)、脱酸素剤 (THPC) から作られる標準 PAGAT ゲルに、増感剤として塩化マグネシウムを加えた高感度ゲルを使用した。

較正曲線作成用として ϕ 18 mm の 30 mL 平底ガラス試験管を5本と、線量分布測定用として一辺が 10 cm の 1L 角型のアクリルファントムを2つ作製した。測定は兵庫県立粒子線医療センターの 150MeV の陽子線を用いた。30 mL 平底ガラス試験管は SOBP6 cm としタフウォーターファントム中で軸方向に 3、6、9、12 Gy の照射を行った。また、1L 角型ファントムについては、ひとつは 150MeV の陽子線を SOBP6 cm で 3 Gy の一門照射を行い、もうひとつは一門 3 Gy で直交二門照射を行い、計 6 Gy を照射した。

照射後の試験管およびファントムは東広島障害者リハビリテーションセンターの 1.5T の MRI 装置を用いて T_2 緩和速度 (R_2) 分布を求めた。このとき SOBP の中心付近での R_2 分布の測定を行った。

【結果】試験管を用いて作成した較正曲線を利用して、1L 角型ファントムの吸収線量分布を求め、縦軸に線量 [Gy]、横軸に試験管底からの距離 [mm] をとったグラフを図1、2に示す。図1が1門照射、図2が2

門照射のもので、a にビーム方向、b に軸外方向の R_2 分布を示している。

図1の a.b を足し合わせたものを図3に示す。これと図2を比較すると形状が概ね一致しており、積算性は保持されているといえる。しかし、線量については 15% 程度過大評価された。今後の課題として容器の改良や、ファントムサイズの影響、大きなファントムに対する較正方法の確立などが考えられる。

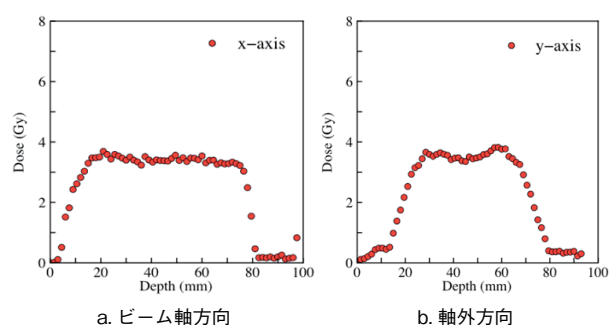


図1 1門照射における吸収線量分布

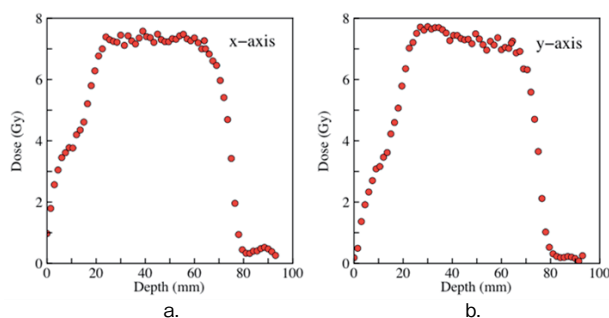


図2 2門照射における吸収線量分布

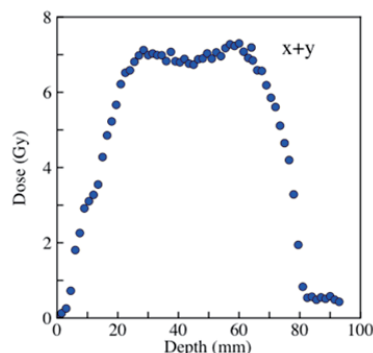


図3 1門照射の軸方向(a)および軸外方向(b)を足し合わせた吸収線量分布

【参考文献】

- 1) 第103回 日本医学物理学会学術大会 (横浜)、富永、他 “ポリマーゲル検出器 (アクリルアミド系) の陽子線に対する吸収線量感度特性”

○大上 龍馬、堀野 翔太、福本 正理、吉岡 宗徳、富永 孝宏、林 慎一郎、笛吹 修治
広島国際大学 保健医療学部 診療放射線学科

【背景】放射線照射後のポリマーゲル検出器内の吸収線量分布を定量化するのに、通常はMRI撮像により求めたR2画像から、R2-吸収線量特性を用いて吸収線量を求めるのが一般的で、通常、その際に用いるR2-吸収線量特性は、ゲルの水等価性の仮定をもとに水中での電離箱線量計の計測値やそれをもとに計算された治療計画と比較することにより求める間接的較正が行われている。

【目的・検討事項】本研究では、直接的にポリマーゲル線量計内の吸収線量を測定する方法としてガフクロミックフィルムをポリマーゲル検出器内にいれてその光学濃度とR2値を比較する方法について検討を行う。

検討事項として、初めに、ゲル内にガフクロミックフィルムを長時間入れたときのフィルムの変質について調べる。次に、ポリマーゲル検出器内にガフクロミックフィルムを入れた時にR2-吸収線量応答特性にフィルムは影響を与えるのかどうか、について調べる。

【方法】今回は、ポリマーゲル検出器の容器としてフィルムを支持するために5 mmから2 cmの間隔で壁面に2 mmの切込がはいったアクリル箱を(5 cm×5 cm×10 cm)3個使用した。この容器の2つには、ゲルとしてMGS社のBANG3を充填して、一つにはガフクロミックフィルム9枚をゲル中に設置した。残りの一つにはガフクロミックフィルム(EBT2)9枚を水中に設置した。このとき水中でのフィルムの変質が起こらないように、照射直前に水で容器を満たし、照射直後には水を排出した。広島国際大学のリニアックを用いてそれぞれに線量率300MU/min、700MU(7Gy相当)X線を照射し、照射の翌日に本学の0.3TMRIで撮像を行い、本学のゲルグループで開発したゲルツールソフトでR2イメージの画像データを作った。ガフクロミックフィルムの光学濃度は、コニカPDA65濃度計の644nm波長で測定した。

【結果】フィルムが入った場合と入っていない場合のゲル検出器中の深部R2プロファイルを比較してみると(Fig.1)、フィルムが入っているときは、検出器容器のX線入射口付近でR2値の揺らぎがあり、R2値の標準偏差もフィルムが入っていない場合より約30%程度大きい。分布中間部のR2の絶対値および傾きは一致しており、フィルムによるR2の影響は小さいことが分かった。

ガフクロミックフィルムに関しては、ゲルが浸透して変質していたのはフィルム端の切り口から5 mm程

度で、感光層が全てベースから剥がれてしまうようなダメージのあるフィルムはなかった。

水中で照射されたフィルムとゲル中で照射されたフィルムの深部光学濃度分布は、同じ条件で照射したにもかかわらずゲル中のフィルム濃度は水中のフィルムと比較すると約0.05程度濃度値が高くなった。(Fig.2) この違いの原因として、まず第1に考えられるのはフィルム表面でゲル中の薬品との反応が起こり、経時的にバックグラウンドが増加した可能性が考えられる。そこでゲル中のガフクロミックフィルムバックグラウンドの経時変化を調べてみたが、バックグラウンドの経時変化はゲル中に1週間入れておいてもせいぜい0.01程度でほとんど変化は認められなかった。

今後の課題として、この違いが照射後生成したポリマーとフィルム表面との反応によるものか、あるいはその他の原因によるものかを調べ、ガフクロミックフィルムを使ったゲル線量計の校正法について更なる検討を行っていく。

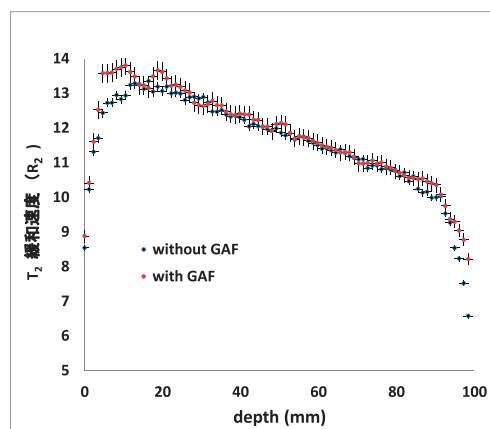


Fig.1

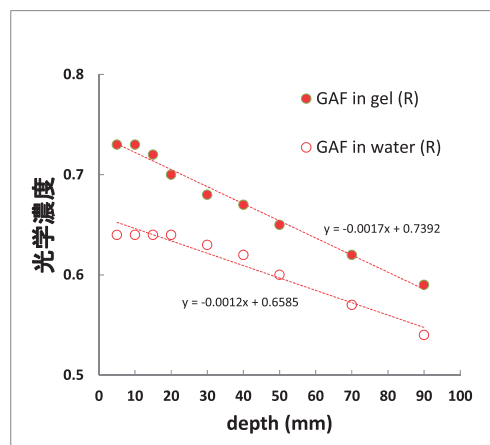


Fig.2

○福本 正理、堀野 翔太、上村 美沙希、原 夕貴、竹村 茉莉、與那城 剛、富永 孝宏
 広島国際大学 保健医療学部 診療放射線学科

【背景】ガフクロミックフィルムのモノマーは紫外線に対する感度が高いので、紫外線吸収剤を感光層に含み、室内灯などの低紫外線成分に対しての感度を下げているが、高照度紫外線に対する感度についてはこれまでに報告されていない。

【目的】ガフクロミックフィルムの高照度紫外線に対する感度特性を紫外線ランプを用いて調べ、紫外線線量の測定に応用することを検討する。

【実験】

使用機器：ガフクロミックフィルム (EBT2)、高圧水銀ランプ (代表波長 365nm)、紫外線強度計 (測定波長域 280～400nm)、コニカ濃度計

方法：紫外線ランプとフィルムの距離を変えて、強度計を用いて紫外線強度を 0.8, 2.3, 4.0 mW/cm² に調節した後、フィルムに 5, 10, 20, 60 分と時間を変えて露光を行った。露光後のフィルムは 644nm の R 波長、546nm の G 波長、436nm の B 波長の 3 つの波長域で光学濃度を測定した。

【結果】R 波長、G 波長、B 波長で測定した時の、露光時間に対する、それぞれの強度の光学濃度の変化から、単位時間あたりの強度と照射時間の積から総露光量を求めた。それぞれの波長に対するガフクロミックフィルムの紫外線に対する応答特性曲線を図 1 に示す。図が示すように、R と G 波長に対する特性はほとんど等しく、X 線照射後と同様に R、G 波長領域での濃度変化が B 波長領域の変化と比較して大きかった。この結果を X 線に対する特性曲線と比較すると、ガフクロミックフィルムの紫外線に対する感度が高いことがわかる。

紫外線量測定の応用として、太陽光の紫外線量を 8 月晴天時に屋外にガフクロミックフィルムを設置して計

測を行った。図 2 に、図 1 の光学濃度 - 紫外線量特性から求めた太陽光露光時間に対する紫外線量を 9 月に測定した結果と比較して示す。近似した直線の傾きから求めた夏の紫外線量は平均 540 mJ/cm²min、秋の紫外線量 360 mJ/cm²min のおよそ 1.5 倍に相当する。また、市販の日焼け止めの紫外線に対する効果を調べた。化粧用コットンに水、SPF30、SPF50 の日焼け止めクリームをそれぞれ染み込ませてフィルムに乗せ、4mW/cm² の紫外線強度で 15 分の露光を行い比較した。SPF30、SPF50 液を染み込ませたコットンに乗せたフィルムは全く濃度は変化せず日焼け止めクリームの紫外線に対する防御効果を確認することができた。

次に使用した紫外線ランプの 2 次元紫外線量分布を調べた。15 分間の露光を行った後のフィルムを図 3 に示す。図 4 にフィルムの濃度変化を濃度計の R 波長測定によりもとめた 1 次元プロファイルを示し、図 5 にスキャナーで取り込んだグレースケールイメージを Image J で求めた 2 次元濃度分布を示す。

【まとめ】ガフクロミックフィルムの紫外線に対する光学濃度特性を調べた。その結果、紫外線に対するフィルムの感度は充分高く、高紫外線量測定に有効であることが分かった。今回はフィルムの特性を調べるのが目的だったのですべて濃度計により計測を行ったが、通常行われているようにフィルムスキャナーによる解析で 2 次元および 3 次元的な紫外線線量分布を求めることも可能である。

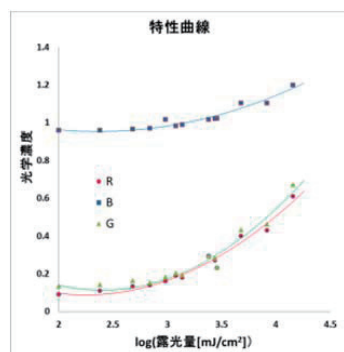


図 1

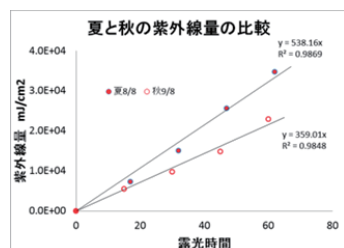


図 2

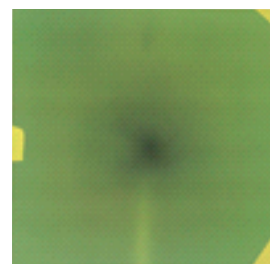


図 3

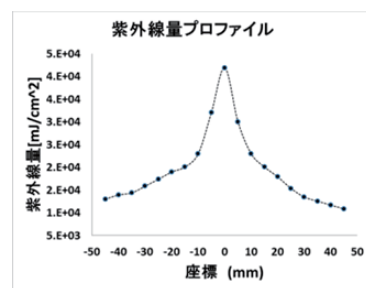


図 4

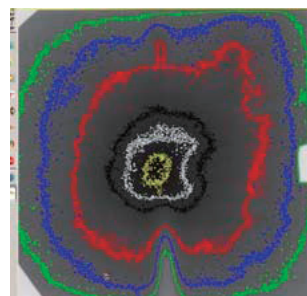


図 5

線量検証技術の確立に向けた Radiochromic film の経時的特性に関する検討

○駒居 柚哉¹⁾、笈田 将皇²⁾、加茂前 健³⁾、中山 真一³⁾、銅山 恒夫³⁾

1) 岡山大学医学部保健学科、2) 岡山大学大学院保健学研究科、
3) 特定医療法人鴻人会 岡山中央病院放射線科

【背景】放射線治療分野の品質管理ではフィルムを用いた2次元解析が必須とされている¹⁾。病院情報システムのフィルムレス化により湿式フィルムの利用が困難となりつつあり、現像処理が不要な Radiochromic film (以下、RC フィルム) への移行が進んでいる。RC フィルムは放射線化学反応に基づき変色し、放射線照射終了後も継続的に変色することが知られており²⁾、線量検証時には時系列を備えた解析が必要とされる。

【目的】放射線治療分野で使用される RC フィルムに関して濃度およびノイズ量の経時的推移を分析し、ノイズ量に起因する線量不確かさ、経時的濃度変化に起因する線量不確かさ、濃度安定時間を明らかにする。

【方法】

1. フィルム試料作製：本検討では GafChromic RTQA2 film を評価対象とした。水等価ファントムにフィルム片を挟みミニアックの6MV-X線 で0から3Gyまで15段階の線量を照射した。
2. デジタル化：フィルム試料を照射後1から120時間まで経時的にスキャンした。各フィルム中心に対してROI(2×2 cm²)を設定し、平均値および標準偏差を取得した。

3. 線量不確かさの算出

- ① ノイズに起因する線量不確かさ：スキャン時間毎にピクセル値と線量の近似曲線を微分し、任意時間の微分計数 a を算出した。計数 a を含む一次関数式より ROI 内のピクセル値標準偏差を線量に換算した。
- ② 経時的濃度変化に起因する線量不確かさ：照射線量毎にピクセル値と時間の近似曲線を微分し、任意時間の微分計数 b を算出した。計数 b を含む一次関数より任意時間±1時間の線量変化を算出した。
4. 立ち上がり飽和時間の算出：120時間後のピクセル値を基準として、ピクセル値の変化量が63.2%に達するまでの時間を次式より算出した。

$$y_i = y_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

【結果および考察】正味濃度は照射後時間が経過するほど高くなり、放射線刺激による化学変化が継続していると考えられた (Fig.1)。ノイズに起因する線量不確かさは照射線量に依存し、経時的変化は少なかった (Fig.2)。経時的濃度変化に起因する線量不確かさは、

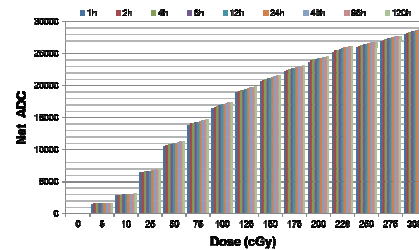


Fig.1
照射線量と正味濃度の経時変化

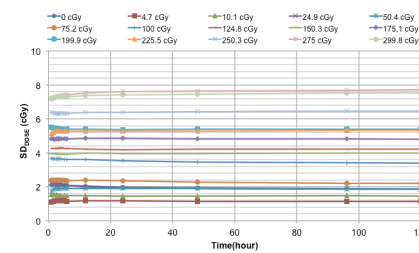


Fig.2
ノイズに起因する線量不確かさの経時変化

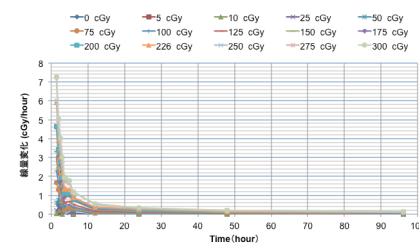


Fig.3
経時的濃度変化に起因する線量不確かさの経時変化

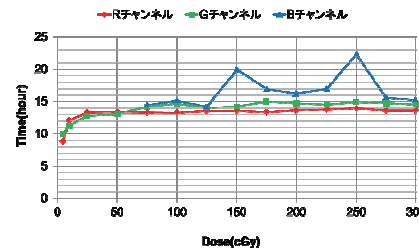


Fig.4
RGB チャンネル毎の立ち上がり飽和時間と線量域の関係

約12時間まで急激に低下し、その後緩やかに低下した (Fig.3)。また、照射線量が大きいかほど単位時間あたりの濃度変化量は大きかった。ピクセル値の変化量が63.2%に達するまでの時間は照射線量が大きいかほど延長傾向にあり約10から14時間であった。(Fig.4)。

【結論】本研究で用いた GafChromic RTQA2 film は、0から3Gyの線量域において濃度が安定するまでに約14時間かかることが明らかとなり、それ以内の短時間解析においては経時的に不確かさが大きく変化するため注意を要することが示唆された。

【参考文献】

- 1) “強度変調放射線治療の線量検証法” 医学物理. Vol.30, Sup.6
- 2) T. Cheung, M. J. Butson, and P. K. N. Yu, “Post-irradiation colouration of Gafchromic EBT radiochromic film,” Phys. Med. Biol. 50, N281–N285 (2005).