

放射線損傷予測の高精度化と高効率化 —フィルム校正関数と画像解析ソフトの選択—

IMPROVEMENT OF ACCURACY AND EFFICIENCY FOR RADIATION DAMAGE PREDICTION – SELECTION OF THE FILM CALIBRATION FUNCTION AND IMAGE ANALYSIS SOFTWARE

成山展照^{#, A)}

Nobuteru Nariyama ^{#, A)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

For higher accuracy and efficiency of high radiation doses measurements, calibration functions with less numbers of parameters were applied to the measured intensity of EBT3 and HD-V2 GafChromic films irradiated with ⁶⁰Co γ rays. Three calibration points were necessary up to 20 Gy for EBT3, and five calibration points were necessary up to 18 kGy for HD-V2. As for the color map, profile, ROI average and 3D map, the image analysis software of FilmQA Pro, Origin Pro and MATLAB were compared.

1. はじめに

加速器マシン収納部内はビームロス等により2次的に発生する放射線が、機器内の半導体や高分子材料等に損傷を与える。汎用的な材料については、損傷に至る線量レベルが ⁶⁰Co γ 線を用いた一連の照射試験によりデータベース化されており[1]、加速器運転定常時の線量率が得られれば、損傷により機能を失う時期を予測することができる。

測定は、位置情報も得られるフィルムが有用である。SPRING-8 では、高線量用のガフクロミックフィルムが今まで主として用いられてきたが、SPRING-8 II では 6GeV 運転が想定されていることもあり[2]、またスタディのような短時間の利用も増えてきており、数 Gy 以下にも感度を持つ低線量用のフィルムが頻繁に利用されるようになってきた。それとともに、今まで使用してきた画像解析ソフトの機能では、低線量解析における校正関数等、最近得られた知見等を十分に利用し切れない点も顕著になりつつあった。

フィルム解析ソフトは、特にメーカーから推奨されたソフトがあるわけではなく、各ユーザーが市販あるいは無料[3]の画像解析ソフトを選択して使用しているのが現状である。一方、近年の画像解析技術・可視化技術の進歩は著しく、従来画像ファイルを扱えなかったグラフ系ソフトも扱えるようになるなど、バリエーションも増えており、最新技術をいち早く取り込んだソフトに変更すれば、線量測定的大幅な高精度化や効率化に資することができると思われる。

以上の点から、本研究ではフィルム読み取りの高精度化及び効率化を目的に、最適な校正関数の検討とガフクロミックフィルムに使用可能な複数の解析ソフトを相互に比較したので、報告する。

2. 比較方法

比較に用いたソフトウェアは、①FilmQA Pro (2015) [4]、② Origin Pro (Ver. 2016)、及び③ MATLAB (Ver. R2015b) + Image Processing Toolbox の3種類である。①は、ガフクロミックフィルム専用に市販され、カラーキャンを前提としている。②は、一般的なグラフソフトとして知られているが、最近画像の読み込みと演算機能が追加された。ソフト特有の LabTalk 言語を利用して画像を行列ファイルに変換するプログラムを作成した。③は、画像のような行列ファイルを直接扱える高速なプログラミング言語で、広い分野において利用されている。これらのソフトを Windows 7 上で動作させた。

ガフクロミックフィルムは、低線量用の EBT3 と高線量用の HD-V2 を対象とした。EBT3 は、0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 Gy の7点、HD-V2 は、5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1k, 2.5k, 5k, 10k, 18kGy の12点の線量を、⁶⁰Co γ 線を用いて照射した。

スキャナーには、セイコーエプソン製 ES-10000G を用いた。FilmQA Pro 用には照射フィルムを 48bit カラーキャンし(Figure 1)、その赤色成分を利用し、Origin、MATLAB 用には、16bit グレースキャンした画像を使用した。

校正関数に関して、著者が今まで用いてきた Image-Pro Plus ソフトの場合、ラグランジュ補間式のみであったため、HD-V2 及び EBT 両方について使用できた。しかし、この場合、必要なダイナミックレンジや精度に応じて校正点数を増やす必要があった。一方、EBT については、次式

$$X(D) = A + \frac{B}{D-C} \quad (1)$$

の使用がメーカーにより推奨されている[4]。ここで、 $X(D)$ はピクセル値、 D は線量を表す。パラメータの数が A, B, C の3個と少ないため、多項式フィッティングに比べて校正点数が少なく済むと主張されている。そこで、式(1)と

[#] nariyama@spring8.or.jp

多項式の両方でフィッティングを行った。

各ソフトの結果表示機能は、カラーマップ、断面図(プロファイル)、ROI(関心領域)平均値及び3Dマップについて調べた。

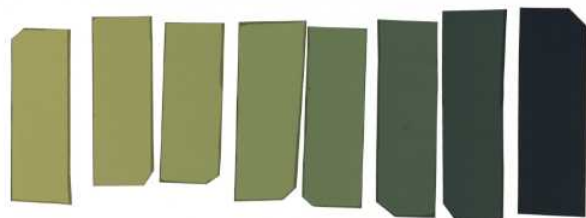


Figure 1: Color scanned picture of the irradiated EBT3 film.

3. 結果と考察

3.1 関数フィッティング

EBT3 フィルムへの式(1)の適用は、FilmQA Proにて行った。Figure 1 に、RGB3 色の吸収率をフィッティングした結果を示す。これは、全7点でフィッティングした結果であるが、赤色の結果は、0.2, 2, 20Gy の3点校正でも7点校正に比べて関数値は最大 14%しか相違せず、確かに校正点数を減らせることを確認した。各パラメータ値は、7点校正の場合、 $A = 0.026, B = 2.317, C = -3.92$ 、3点校正の場合、 $A = 0.043, B = 1.803, C = -3.089$ であった。一方、グレースキャン時のピクセル値に対するパラメータ値は、Origin 上でフィッティングすると $A = 1873, B = 220942, C = -6.22$ であった。

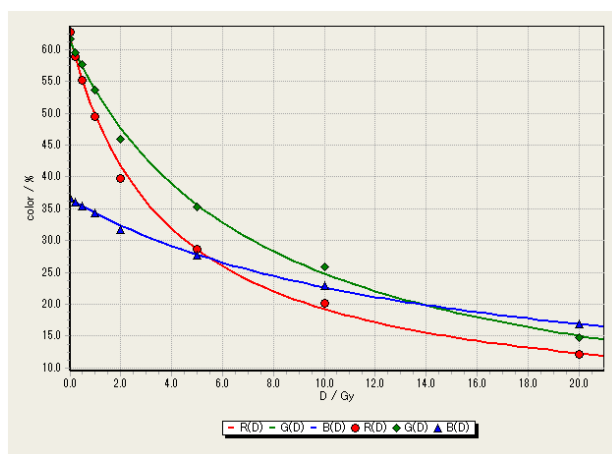


Figure 2: Calibration function (1) of EBT3 for RGB on FilmQA.

線量対ピクセル値に対しては、多項式では精度良くフィッティングできなかった。一方、線量対吸光度に対して多項式フィッティングした場合、Figure 3 に示すように5次関数 $y = -1.20 + 1.10x - 0.275x^2 - 0.406x^3 + 0.452x^4 - 0.108x^5$ が必要となった。すなわち、6個の校正点数を要した。試

しに、上記と同様に3点校正と7点校正時に得られた2次関数と5次関数を用いてフィルム透過率を計算したところ、0.2Gyと2Gyの間で最大25%の違いが見られた。このように、多項式フィッティングの場合、高次式となり多数の校正点が必要となる。

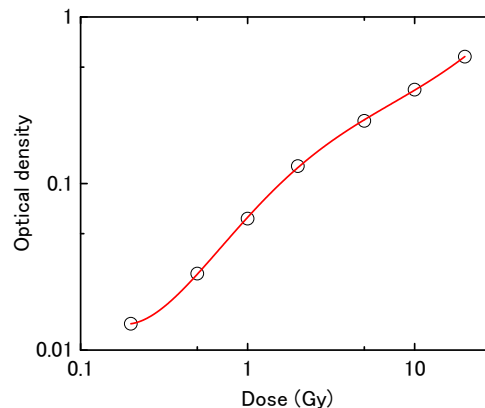


Figure 3: A calibration curve fitted to the optical density of EBT3 with a polynomial function.

次に、HD-V2 フィルムに式(1)を適用した場合、5kGyまではフィッティング可能であったが、5kGyを越えると測定値から乖離していった(Figure 4)。この時、 $A = 3436, B = 1.58 \times 10^7, C = -339$ であった。一方、多項式フィッティングした場合、4次式 $y = 4.91 - 0.50x + 0.428x^2 - 0.163x^3 + 0.0168x^4$ が必要となった。線量対吸光度曲線の全12点を多項式フィッティングした場合は、レンジが広いため Fig. 3 の EBT3 と異なり精度良くフィッティングさせることができなかった。

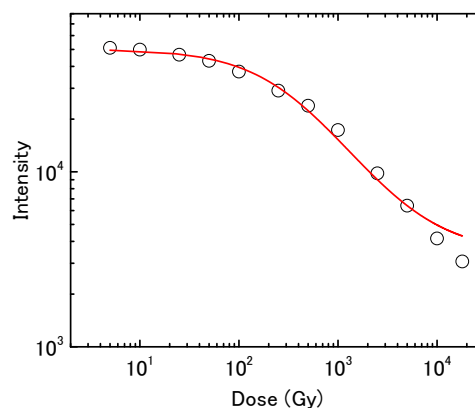


Figure 4: A calibration curve of HD-V2, fitted with Eq. (1).

実際の換算では、ピクセル値ないし吸光度から線量に逆変換するため、3次以上の多項式では複雑になる。そこで、HD-V2 に関しては、必要な場合 5kGy までは式(1)

を用い、それ以上の線量ではリニアフィッティング(Figure 5)を用いる「場合分け」を行う方法がある。

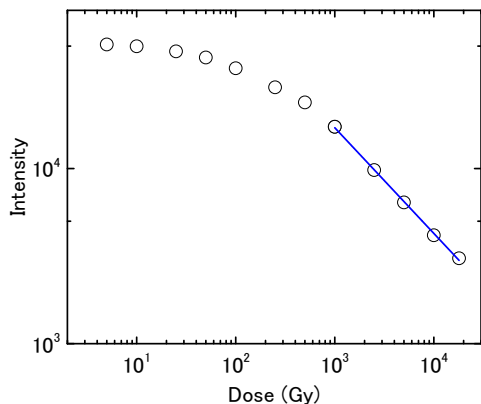


Figure 5: A calibration curve of HD-V2 above 1 kGy, fitted with a linear function.

3.2 結果表示機能のソフト間比較

線量分布の結果を視覚上、効果的に見せる機能は、線量分布を的確に把握する上で重要である。その代表がカラーマップである。輝度から変換した線量に直接関係づけられた色分布(カラーチャート)により表現し、ワンクリックで全体の分布がわかりやすい画像として出力されるのが、理想である。

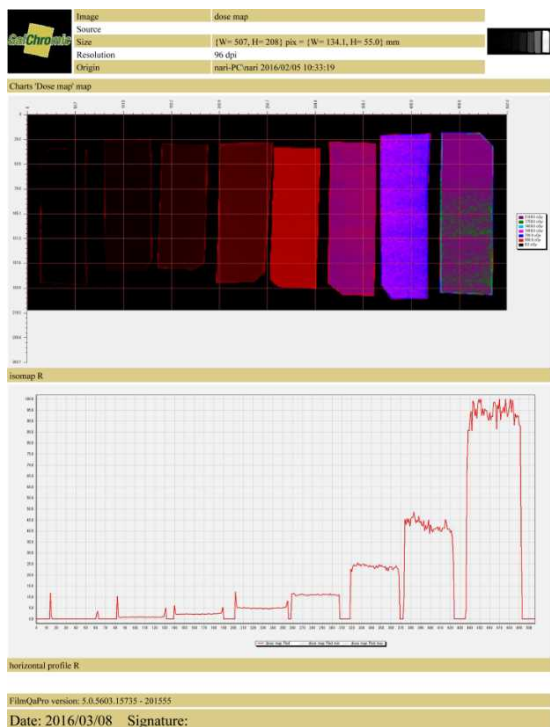


Figure 6: Color map and profile of EBT3 on FilmQA.

Figure 6, 7, 9 は、未照射分を合わせた 8 点の EBT3 校正フィルムの FilmQA、Origin 及び MATLAB カラーマップ出力結果である。カラーチャートは、どれも表示することができる。線量の違いをより明瞭に示したのは、Figure 7 の Origin である。参考に用いた LabTalk プログラムを Figure 8 に示す。

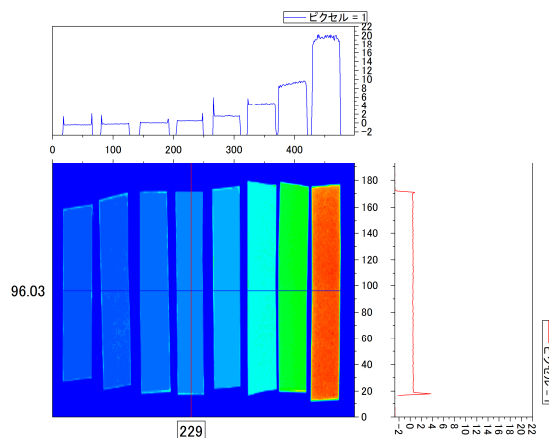


Figure 7: Color map and vertical and horizontal profiles of EBT3 on Origin.

```

////////////////////////////////////
// Main Code
////////////////////////////////////
[Main]
// Imports image inputted by the dialog window
impImage;

// Converts the gray image to the matrix
img2m;

wks.addCol(); // Add the matrix object
wks.col2.numericType = 1; // Data type -> double
wks.active = 2; // Activate the 2nd matrix object
Mat(2) = 220942/(Mat(1)-1873)-6.22;
    
```

Figure 8: LabTalk program in the ogs file of Origin.

断面図(プロファイル)の比較も Figure 6, 7 及び 10 に示す。プロファイルを定義する領域の幅は、FilmQA と Origin は変えることができる。参考に用いた MATLAB プログラムを Figure 11 に示す。

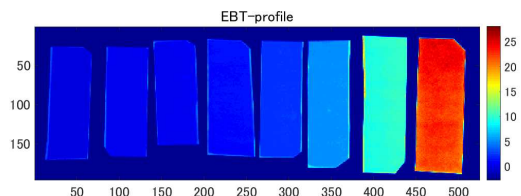


Figure 9: Color map of EBT3 on MATLAB.

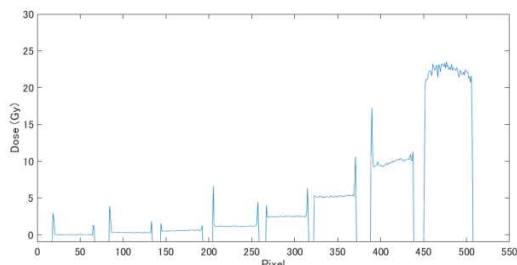


Figure 10: EBT3 profile on MATLAB.

```
Prompt={'Enter file name'};  
Title='Input FILENAME';  
Num_lines=1;  
Def={'EBT3_2016.tif'};  
Answer = inputdlg(Prompt, Title, Num_lines, Def)  
  
A = imread(Answer{1});  
I = double(A);  
B = 220942;  
D = B./(I-1873)-6.22;  
imagesc(D); colormap(jet); colorbar; title('EBT-profile');  
fl =(gcf);  
  
[cx, cy, c] = improfile;  
figure, imagesc(D)  
plot(cx, c);
```

Figure 11: MATLAB program for the profile of Figure 10.

ROI 平均値は、線量値を知る上で有用である。MATLAB では `roipoly` コマンドで多角形の ROI を指定し、`mean` コマンドで平均値を出力させる。Origin Pro は、面積分ガジェットを使用して取得できる。FilmQA は ROI の大きさを変えられないようである。

3D マップは美しいが、細部がわかりにくい実用的にはあまり利用価値が高くない。FilmQA、Origin、MATLAB とも出力することができた。数値演算速度は、輝度から線量への換算時に対数関数等を使用すると、違いが出た。Origin より MATLAB が高速であった。

4. まとめ

今回示したように、最適なフィッティング関数は、フィルムの種類と線量域に依存する。EBT3 で 20Gy までの校正式は、式(1)がパラメータの数も少なく最適である。一方、HD-V2 は、広線量域で使用する場合が多く、線量域を2つに分け、低線量では式(1)を、高線量ではリニアフィッティングさせる方法が良いように思われる。この場合、5 点以上、校正点が必要である。

バックグラウンドの補正は、感度付近で読み取りを行う場合は有用である。FilmQA は対応している。他ソフトの場合、比例させて補正を行う。

今回の結果からは、Origin Pro がグラフの描画をアイコンにより逐一行え、画像も美しかった。初心者にも扱いやすいシステムを構築できる。グラフソフトだけあって、表示のオプションも豊富である。しかしながら、プログラミングの優劣が結果を大きく左右することに注意を払う必要がある。

参考文献

- [1] Maier, P. and Stolarz, A., "Long-term radiation commercial cable-insulating materials irradiated at CERN", CERN 83-08, 1983.
- [2] <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [3] <https://imagej.nih.gov/ij/>
- [4] <http://www.veritastk.co.jp/cat/ETC-ASH-05-03/>