

## 2章 TMR 回帰式の作成目的・ポイント・手順

この章では組織最大線量比( $TMR$ )や組織ファントム線量比( $TPR$ )の回帰式作成法の手順について説明する。ここでは  $TMR$  を例に回帰手順を示すが、 $TMR$  は基準深を最大線量深に規定した  $TPR$  の一種であり、どちらの場合でもこの手法の手順は変わらない。

### 2-2. $TMR$ を1つの回帰式で求めることが出来るようにする

Excel を使用した独立検証プログラムを作成する場合、 $TMR$  を求める方法として、入力されたデータを表引きする table lookup 法があるが、ここで紹介する入れ子形式の  $TMR$  回帰式は、これと同等に便利であるばかりでなく、表にない深さ・照射野に対して直線内挿ではなくデータの全体的変化を考慮した算出が可能である。ただしデータの両端(測定深では浅い方と深い方、照射野サイズでは小照射野と大照射野)は、回帰式の精度が落ちるので、測定データは臨床で使用する深さより、十分に深い点まで測定しておく必要がある。またこの作成手順では、ビルドアップ領域を回帰の対象としてはいない。

### 2-3. 少ない測定データによる精度の確保および測定データ検証作業である

回帰式の作成作業そのものが、データ全体を見渡した測定データの検証作業の一環である。この手法はデータ間を単純な直線内挿したものではないため、一部に測定誤差を持っている場合にも頑健である。またこの方法を使えばRTPSへの入力に必要な、“ゼロ照射野の  $TMR$  ”を、単純な外挿法ではなく求めることができる。“ゼロ照射野の  $TMR$  ”とは、散乱成分のない(照射野のない)一次成分のことで、光子の減弱のみを考慮した、直接測定ができない概念上の量であり、散乱成分である散乱最大線量比  $SMR$  とともに Clarkson 積分法による不整形照射野の線量評価に利用される。

### 2-4. 日常の照射条件への応用を考慮して“照射野半径”を使用

$TMR$  の変数である照射野サイズは、正方形の1辺ではなく等価円形照射野の半径を利用する。不整形照射野における  $MU$  値を手計算で行う場合、 $TMR$  や  $S_p$  を等価円形照射野の半径で評価し、Clarkson 法と同様な手法を利用することで、計算精度の確保が可能になる。Clarkson 法と聞くとRTPSで使用する複雑な方法というイメージがあるが、保科が示した方法で Excel を利用して実施すれば、その作業時間は思った以上に短く、日常業務にも十分対応可能である。正方形照射野の辺を等価円形照射野の半径に変更する変換式は、下記の Bjärgard の式をここでは使用する。

$$r = 0.5611s \quad r: \text{等価円形照射野の半径} \quad s: \text{等価正方形の1辺}$$

### 2-5. $TMR$ を算出するための基本計算式

$TMR$  算出するための、入れ子形式の回帰式を下記に示す、

$$TMR(d, r) = a_3(d)r^3 + a_2(d)r^2 + a_1(d)r + a_0(d)$$

$TMR(d, r)$  : 任意の深さ  $d$ 、任意の照射野半径  $r$  での  $TMR$  値

$a_3(d)r^3, a_2(d)r^2, a_1(d)r, a_0(d)$  : 半径  $r$  の3次多項式それぞれの係数、かつ深さ  $d$  の関数でもある。

この式を完成させることにより、任意の深さと照射野に対する  $TMR$  をたった1つの多項式で求めることが出来るようになる。ここでは多項式決定作業の容易性を考え、 $TMR$  の回帰は3次としている。したがって次数は絶対的なものではなく、必要に応じて4次・5次などの多項式に変更して構わない。

「放射線治療技術の標準」では4次の多項式で紹介している。

それでは、実際に  $TMR$  回帰式を作成法に移る、Step.1 から始めよう。

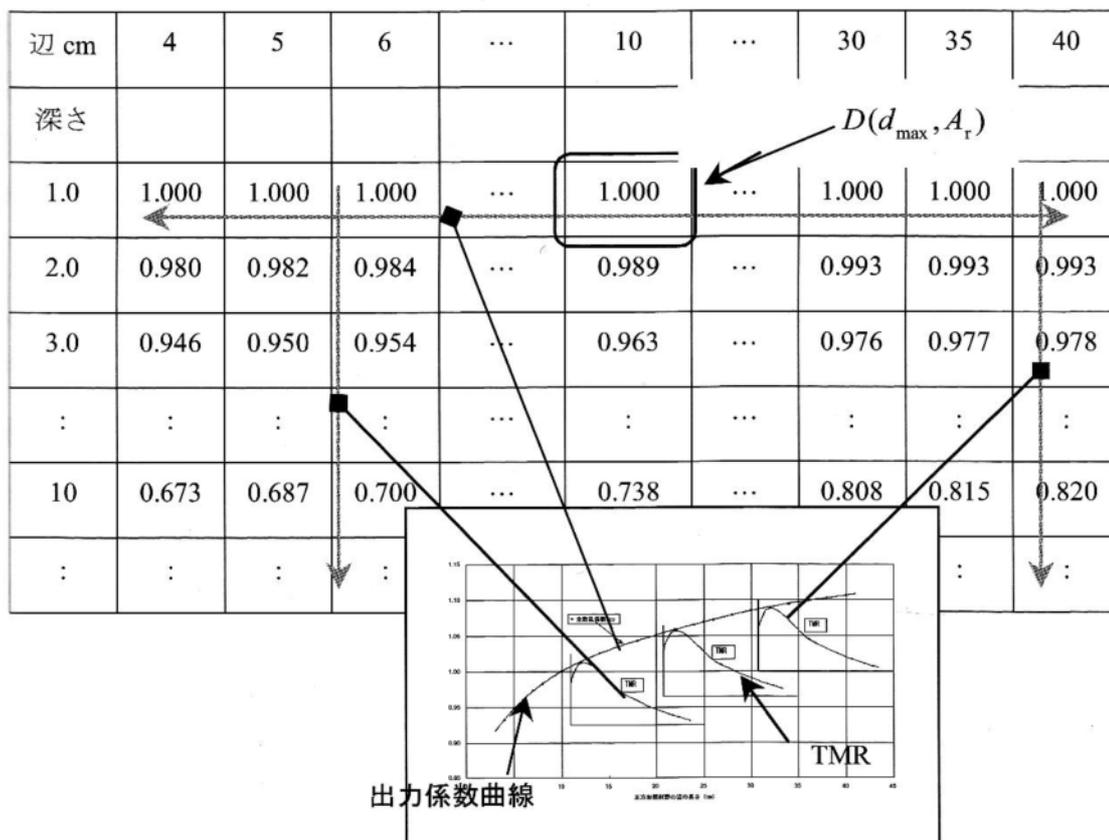
## Step.1 基本データおよび Excel シートの準備

処理を始める前準備として、処理を行う Excel book を作成する。各施設の TMR のデータを、Excel に入力しておく必要がある。ここでは入力終了したワークシート名を“ TMR (基本データ)”とする。

基本データの注意事項として、

1. 3次元水ファントムスキャンシステムの PDD からの計算で求めた TMR でも良い。RTP のメーカーの中には、RTP のビームデータ用として取得した PDD から、計算した TMR を Excel ファイルなどで提供してくれる会社もある。
2. RTP が出力した結果でも良いが、実測した PDD の照射野を処理に利用する。実測以外の照射野は実測データから補間された結果であり、今回の処理に使用することは望ましくない。
3. TMR の場合すべての照射野サイズにおいて、同じ基準深で正規化すること。ここでは基準照射野である1辺が10cmの正方形照射野(等価円形照射野では半径5.611cm)の、TMR測定で得られた最大線量深を統一した基準深とすることにする。

注) 基準深近傍で 1.000 を越えるデータがあっても気にはいけない。これはすべての照射野で最大線量深が同じにはならないことによるものである。各照射野サイズで基準深を最大線量深に変化させれば、もう一つの重要な線量変化因子である出力係数もそれに合わせて基準深を変化させなければならず非常に煩雑である。また実測した以外の照射野サイズでの最大線量深を規定することは不可能に近い。下の図は「放射線治療技術の標準」P089 Fig.3.4.7 であるが、基準深と TMR、出力係数の関係を示したものである。



4. 先に述べたように等価円形照射野の半径で評価する事を忘れない。

右図で示す、サンプルでは 0.1cm 間隔になっているが、1cm もしくは 0.5cm 間隔で十分である。

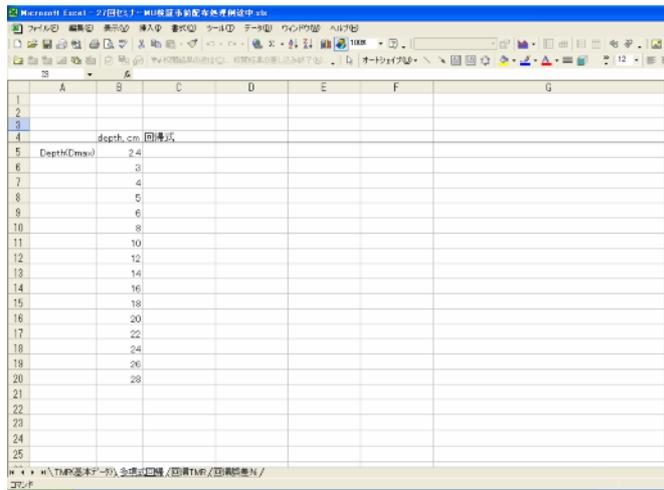
次に入力のすんだ、“TMR (基本データ)”の名前のタグにカーソルを合わせ、マウスを右クリック。移動またはコピー を選択し、**コピーを作成する(C)** をチェックし、ワークシートごとコピーを作成する。

コピーしてできた、ワークシート “TMR (基本データ)(2)” のタグにカーソルを合わせ右クリック「名前の変更(R)」 を選択 “回帰 TMR “と名前を付け、入力したデータ領域を削除する。

続いてワークシート“回帰 TMR ”のコピーを作成し、ワークシート名“回帰誤差 ”とする。

これでデータシート1つと空のシート2つを、作成したことになる。

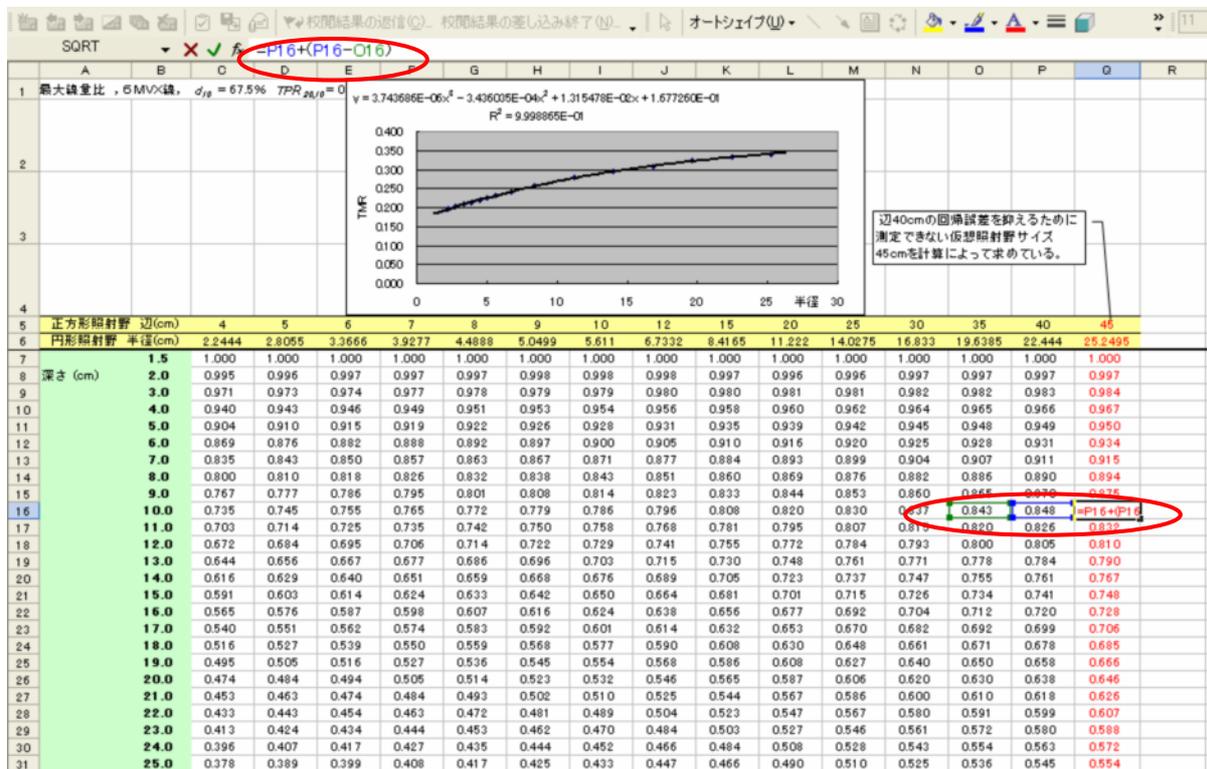
“TMR（基本データ）”と“回帰 TMR ”の間に新しいワークシートを挿入、下図に示すようなシートを作成しワークシート名を“多項式回帰”と名前を付ける。



実際に入れ子方式で回帰式を作成した場合、基礎データの最小照射野・最大照射野・表面付近・最大深度の周辺で誤差が大きくなる。この誤差を低く抑えるコツは、

1. 最小照射野・・・測定精度として十分担保できる最小照射野まで測定する。
2. 最大照射野・・・大照射野では、照射野サイズによる TMR 変化は小さいので、最大照射野よりも大きな仮想最大照射野 TMR を作成して実最大照射野の回帰誤差を低く抑える。(下図を確認)。
3. 臨床で使わない深い範囲までデータ収集(深さ 30cm 以上を目標とする)。

以上の点に注意しながら基本データの見直しも十分におこなう必要である。



これで TMR 入れ子形式の回帰式作成準備ができた、次の Step に進もう。

## Step.2 照射野半径と TMR のグラフ作成

ここではグラフから、近似多項式を作成する。

まず作業がしやすくなるように、円形半径 cm の行を絶えず表示させるように設定する。

この作業により表の深い部分を表示させても、円形半径 cm の行からは常に表示されるようになる。

円形半径 cm の行の下 depth,cm と表示されている TMR の最も浅いデータ行 12 をクリックし、対象行全体を選択。ウィンドウバーから **ウィンドウ枠固定** を選択すると、データ行 12 の上の行 11 からは絶えず表示されるようになった。

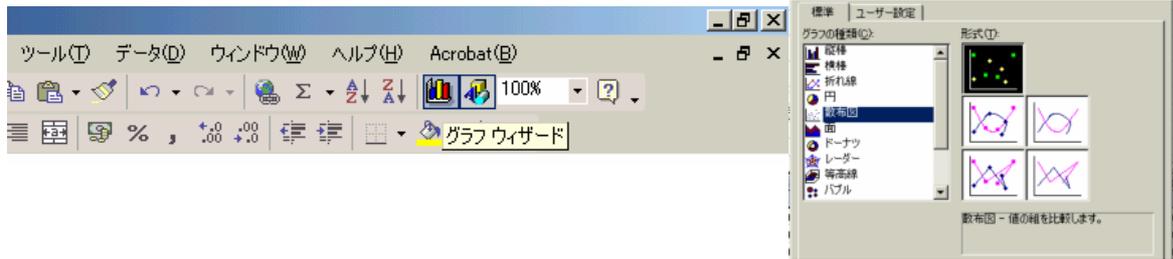
The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data structure:

正方形 辺cm	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40
円形 半径cm	2.244	3.367	4.489	5.611	6.733	8.417	11.222	14.028	16.833	19.639	22.444
depth,cm	2.4	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2.5	1.0000	1.0037	1.0012	0.9992	0.9981	1.0015	1.0010	0.9992	0.9989	1.0014	0.9995
2.6	1.0009	1.0018	1.0000	0.9990	1.0014	1.0010	0.9990	0.9997	0.9999	0.9999	0.9998
2.7	1.0027	1.0037	1.0011	0.9990	0.9996	1.0042	1.0002	0.9997	0.9989	0.9988	0.9995
2.8	1.0016	1.0026	1.0018	1.0008	1.0032	1.0011	0.9988	0.9977	0.9960	0.9981	0.9986
2.9	1.0023	1.0026	1.0017	0.9999	0.9978	1.0063	0.9968	0.9972	0.9959	0.9964	0.9957
3.0	0.9993	0.9995	0.9985	0.9985	0.9985	0.9984	0.9942	0.9942	0.9952	0.9938	0.9959
3.1	0.9996	0.9985	0.9985	0.9972	0.9964	0.9964	0.9926	0.9939	0.9935	0.9950	0.9937
3.2	0.9952	0.9998	0.9966	0.9954	0.9942	0.9977	0.9936	0.9939	0.9925	0.9938	0.9933
3.3	0.9952	0.9951	0.9968	0.9963	0.9959	0.9944	0.9912	0.9917	0.9904	0.9916	0.9927
3.4	0.9925	0.9966	0.9934	0.9947	0.9940	0.9957	0.9986	0.9902	0.9892	0.9905	0.9907
3.5	0.9895	0.9925	0.9935	0.9930	0.9893	0.9904	0.9887	0.9894	0.9881	0.9893	0.9888
3.6	0.9911	0.9925	0.9890	0.9911	0.9881	0.9918	0.9879	0.9882	0.9869	0.9889	0.9879
3.7	0.9853	0.9881	0.9891	0.9861	0.9851	0.9879	0.9854	0.9868	0.9849	0.9859	0.9854
3.8	0.9828	0.9886	0.9873	0.9873	0.9845	0.9858	0.9840	0.9839	0.9833	0.9847	0.9842
3.9	0.9799	0.9844	0.9848	0.9825	0.9824	0.9854	0.9821	0.9825	0.9813	0.9840	0.9833
4.0	0.9777	0.9841	0.9811	0.9816	0.9790	0.9844	0.9802	0.9802	0.9798	0.9812	0.9807
4.1	0.9761	0.9782	0.9799	0.9772	0.9792	0.9805	0.9783	0.9790	0.9778	0.9805	0.9791
4.2	0.9721	0.9785	0.9747	0.9758	0.9734	0.9788	0.9763	0.9775	0.9766	0.9770	0.9776

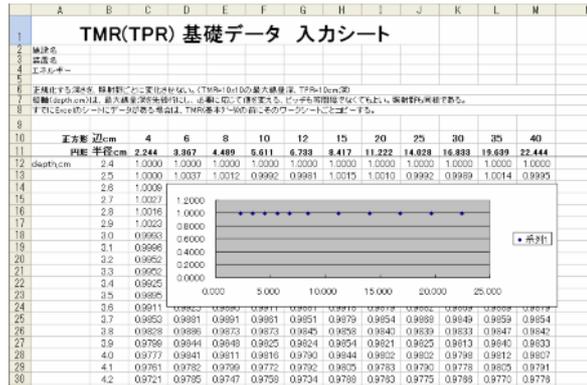
“TMR (基本データ)”の半径と TMR の先頭行を選択。項目(半径 cm と深さ 2.4cm) は選択しないこと。

The screenshot shows the same Excel spreadsheet as above, but with rows 11 and 12 selected. The 'Freeze Panes' feature is active, ensuring that the header row (row 11) and the first data row (row 12) remain visible when scrolling through the data.

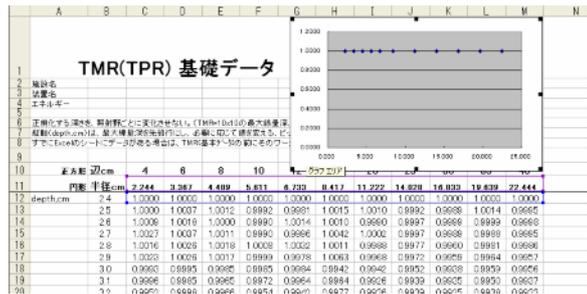
グラフウィザードをクリックしてグラフを作成する、グラフの種類は“散布図”を選択。



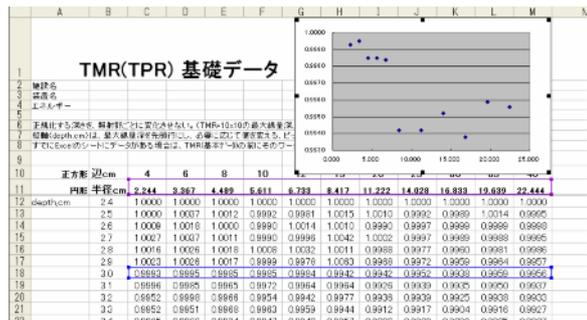
グラフをワークシートの上方に移動し、行幅やグラフサイズを見やすい大きさに整える。先ほど実施した“ウィンドウ枠固定”により、上方に移動したグラフは、絶えず表示される。



作成されたグラフ領域をクリックすると、ワークシート上のグラフに関する、横軸 (半径 cm) とデータ領域 (TMR) が枠で表示される。

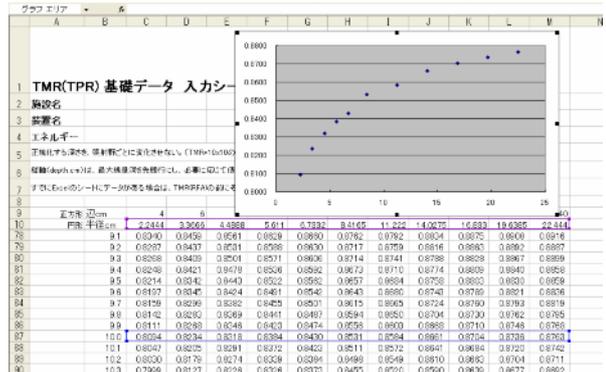


範囲指定されている TMR 値側に、カーソルを近づけると、上下左右矢印マークが表示される。上下左右矢印マークの表示されたところで、マウスの左ボタンを押してドラッグ、下の段に移動させることにより、グラフの表示が変化することを確認する。



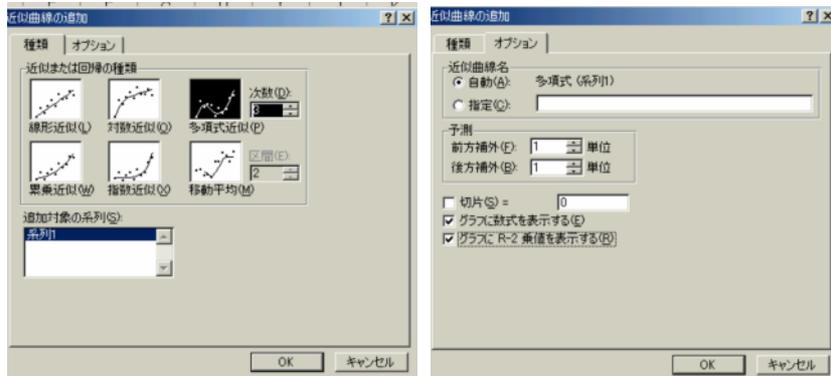
深さが浅い領域では TMR の変化にばらつきが見られることが多く、適切な評価が困難であるので、深さ 10cm まで下げて、グラフの変化を確認。さらに深さを変えてグラフの変化を十分確認しよう。

この例では滑らかな変化を示しており、データに問題がないと判断、次の作業に移ろう。

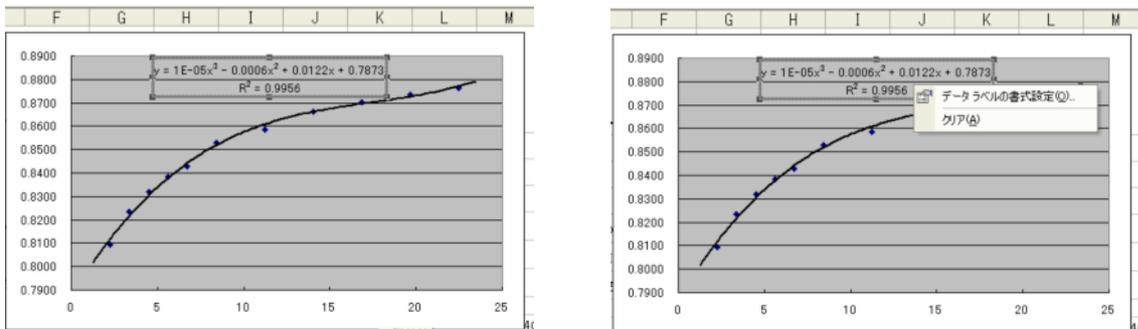


グラフデータが選択された状態で、“グラフ(C)”バー から、**近似曲線の追加** をクリック。

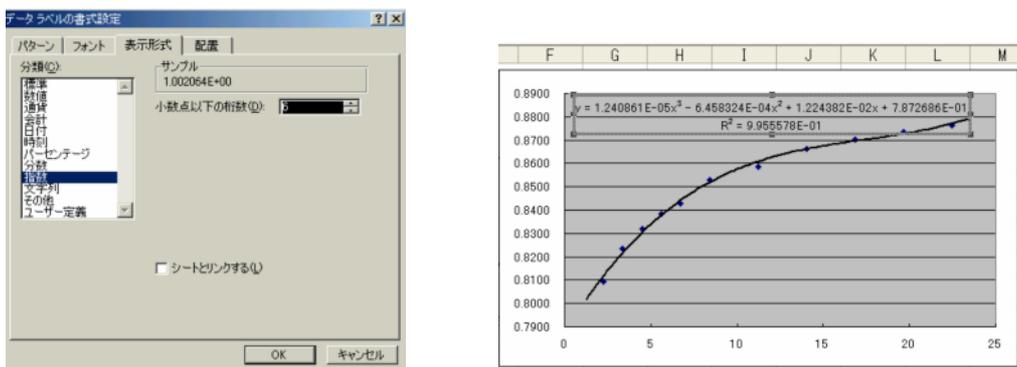
多項式近似を選択、次数を“3”にする。 オプションを開き、前方補外および後方補外に“1”を入力、「グラフに数式を表示する」と「グラフに R-2 乗値を表示する」 のチェックボックスを選択状態にする。



グラフ上に近似曲線と近似式(回帰式)が表示される。 回帰式の領域を選択しマウスの**右ボタン**をクリック。「**データラベルの書式設定**」を選択する。



「表示形式」から“指数”を選択し、「小数点以下の桁数」を“6”にする、これにより表示されている回帰式の有効桁数が6桁に変更された。 多項式回帰をする場合、有効桁数が大きな影響を及ぼすことがあるので、安全のために必ずこのような桁数に設定しておく。



$$y = 1.240861E-05x^3 - 6.458324E-04x^2 + 1.224382E-02x + 7.872686E-01$$

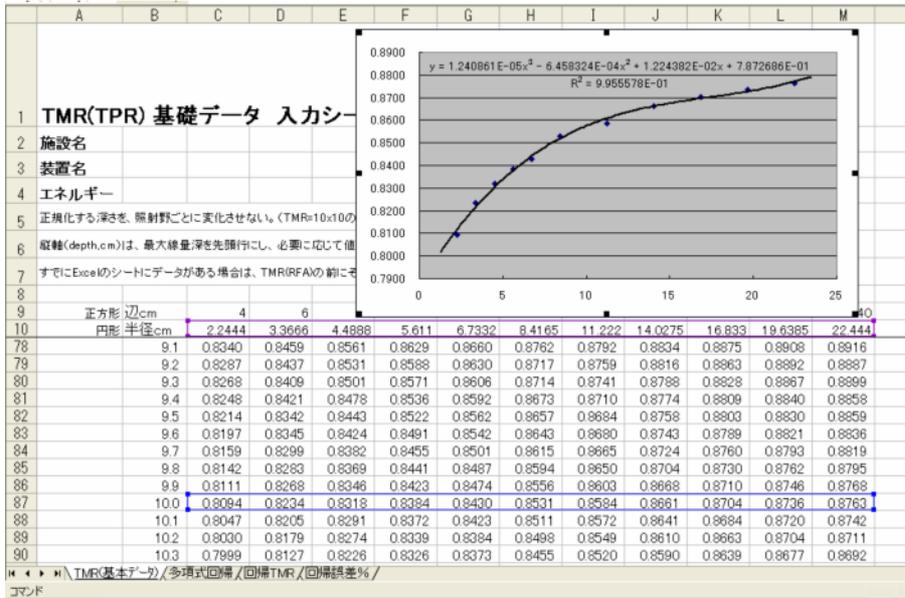
この式は、深さ 10cm の TMR =  $1.240861 \times 10^{-5}r^3 - 6.458324 \times 10^{-4}r^2 + 1.224382 \times 10^{-2}r + 7.872686$  で表すことができるということである。

ここでは3次の回帰式で問題ないと判断し、次の作業にうつろう。

### Step.3 各深さの半径:r に対する TMR の回帰式を順次もとめていく

各深さの半径:r に対する TMR の回帰式を求めるための作業に移る。ここでは作業が混乱しないように浅い領域から作業を実施していく。

グラフ表示領域をクリックすると、元データが選択された状態になる（半径が“ピンク枠”、TMR 深さ 10cm が”青枠”に囲まれる）。

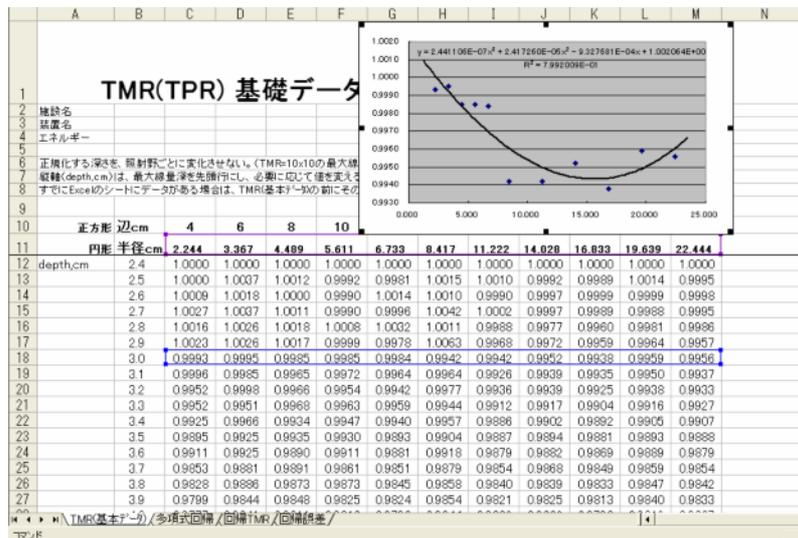


この状態で、TMR のデータ領域を示す“青枠”をドラッグ、回帰処理をする深さ(3cm)で、選択領域を止める。移動とともに回帰式の計算式が変化することを確認すること。

基準深 (TMR では最大線量深) はすべて 1.000 であることが基本であり、回帰式作成の必要はない。

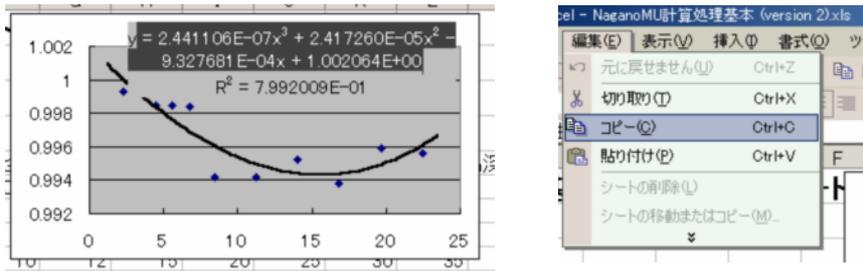
浅い領域での3次多項式での TMR 回帰は、上図に示すように相関係数がそれほど良好ではない。

しかし、この影響が全体に及ぼす程度は低いので、それほど気にする必要はない。



では、深さ 3cm の処理を始めよう

グラフ上の回帰式の部分だけを選択し、“コピー”（ショートカットキー“Ctrl + C”でも ok）.



隣のシート“多項式回帰”を開き、回帰式の行、深さ 3cm の列に対応するセル(C6)に、“貼り付け”.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2								
3								
4			depth,cm	回帰式				
5		Depth/Dmm0	2.4					
6				$y = 2.441106E-07x^3 + 2.417260E-05x^2 - 9.327681E-04x + 1.002064E+00$				
7			4					
8			5					
9			6					
10			8					
11			10					
12			12					
13			14					
14			18					
15			18					
16			20					
17			22					
18			20					
19			24					
20			28					
21			20					



基準深(ここでは 2.4cm)は、入力せずに空欄のままにしておく.

3cm 深での回帰多項式  $y = 2.441106E-07x^3 + 2.417260E-05x^2 - 9.327681E-04x + 1.002064E+00$  を次の処理のために最終的には以下のように分割したい.

- 3 次の係数 : + 2.441106E-07
- 2 次の係数 : + 2.417260E-05
- 1 次の係数 : - 9.327681E-04
- 定数 : + 1.002064E+00

しかしここでは分割作業は行わず、すべての深さの回帰多項式の貼り付け作業終了後、一括して処理する.

では次の深さ:4cm の処理に移ろう.

グラフ領域をクリックし、データ領域の表示状態にする.

青枠をドラッグして、4cm の深さにデータ領域を移動、3cm と同じように、回帰多項式を“多項式回帰”の表の 4cm の横に貼り付ける. すべての深さが埋まるまでこの作業を繰り返す.

単純作業の繰り返しになるが、ミスの無いように慎重に作業を実施すること.

