

ソフトウェアを用いた MU 独立検証 - 臨床運用の提示・評価基準の設定方法 -

福島県立医科大学附属病院 放射線部 ○長澤 陽介(Nagasawa Yosuke)

【はじめに】

過去に頻発した放射線治療における医療事故を受けて、MU独立検証の重要性は今や世界的な共通認識となっている。このことは東北・新潟地域においても例外ではなく、多くの施設で“あたり前の日常業務”としてMU独立検証が行われていることが今回実施させていただいたアンケートからも明らかになった。ここで“あたり前の日常業務”について考えてみると、あたり前の仕事ほど、流れ作業として覚えてしまい、いざ深く考察しなければならない状況に迫られたとき、意外と理解していないことに気付かされる、といった経験はないだろうか。私自身、放射線治療部門に配属された当初は言うまでもなく、現在に至っても日々その繰り返しである。そこで今回は、放射線治療における、あたり前の業務の一つである「MU独立検証」について基本的な事項を復習し、「独立検証を行うために必要なことは?」、「自施設の評価基準ってどうやって決めたの?」、「他施設ではどのような運用をしているの?」といった素朴な疑問について見つめ直す機会になれば幸いである。

本稿のタイトルに「ソフトウェアを用いたMU独立検証」とあるが、ひと言でソフトウェアと言っても、近年の独立検証ソフトウェアは進化を続け、その機能は高度化・多様化しているのが実情である。例えば、より高精度な線量計算アルゴリズムが採用されてきたことや、従来の点線量のみの評価から3次元的な線量分布全体の評価が可能になってきたこと等が挙げられる。このような最新のソフトウェアの動向については、本研究班班長である東北大学病院の佐藤氏にお任せし、本稿では現時点で最も広く普及しているであろうClarkson法を用いた市販のMU独立検証ソフトウェアを対象を絞った内容としたい。

【ソフトウェアの概要】

MU独立検証には、手計算やMicrosoft社製Excelに代表される表計算ソフト、他社製の放射線治療計画装置(Radiation Treatment Planning System:RTPS)、自作/市販のソフトウェアが使用されている。ここでは、市販のソフトウェアが他手法と比較して、どのような特徴があるか述べる。

市販ソフトウェアの最大の利点としては、RTPSからDICOM形式で出力したプラン情報を直接読み込むことで効率的に検証を実施できることが挙げられる。当院では、市販ソフトウェアを導入する以前は、Excelによる独立検証を行っていた。Excelによる独立検証であっても、システムの作り込みによってはこの限りではないが、当院では数多くのパラメータを手入力する必要があったことから、その労力や所要時間、入力ミスなどが懸念されていた。ソフトウェア導入後はDICOMファイルの読み込みにより、簡便・迅速な検証が実現され、それらの懸念を解消することができた。一方、他社製のRTPSを用いた独立検証では、計算ジオメトリや不均質補正などを臨床とほぼ同条件で検証でき、3次元的な線量分布全体の評価が可能であるのに対して、Clarkson法を用いた独立検証ソフトウェアでは、ある線量評価点“1点”のみでの評価であって、線量分布全体の評価とはならないことに注意しなければならない。

市販のソフトウェアは種々のメーカーから販売されており、機能も様々である。通常照射だけでなく、回転照射や強度変調放射線治療などの特殊照射に対応する製品も販売されている。また、従来はRTPSが算出した水等価深を手入力するものが多かったが、最近ではCT画像からRTPSとは独立した水等価深を算出することで独立性を高めた製品もある。現在、本邦で広く使用されている製品の一例をTable.1に示す。

Table 1 市販されているMU独立検証ソフトウェアの一例

製品名	MU CHECK	RadCal	IMsure	Simple MU Analysis	MU Verify
メーカー名	アールテック	LAP	STANDARD IMAGING	Triangle Products	RTQM
通常照射	○	○	○	○	○
特殊照射		○	○	○	○
水等価深の算出			○	○	○

【臨床使用前のコミッショニング】

独立検証ソフトウェアは、細かい機能は違えど、“線量計算する”という意味では、RTPSとほぼ同義である。したがって、独立検証ソフトウェアを臨床使用するためには、RTPSに準じたコミッショニングが必要となる。RTPSのコミッショニングには、ビームデータの測定・登録や線量計算精度の確認、基本的な動作の確認などがあるが、ここでは線量計算精度の確認について詳細に述べる。

線量計算精度は、独立検証ソフトウェアの計算値と電離箱線量計を用いて測定された実測値との比較によって評価されることが普遍的であるが、この確認作業には大きく分けて2つの目的がある。1つは測定・登録されたビームデータに誤りがないか確認することで、単純なジオメトリ(大小様々な正方形照射野や長方形照射野、いくつかの深さ)における実測値と比較する。もう1つの目的は、臨床プランを検証する上で、ソフトウェア自身がどの程度の精度で計算できるか把握するため、臨床を想定した不整形な照射野における実測値と比較する。当院における独立検証ソフトウェアの線量計算精度として、電離箱線量計による実測値を基準としたときの独立検証ソフトウェアによる計算値の相違をTable 2に示す。対象症例は、照射頻度が多い全脳照射、乳房の接線照射、食道に対する対向二門照射、全骨盤照射である。照射部位によって、傾向が異なることが確認できる。臨床使用前に独立検証ソフトウェアによる線量計算が、どの程度の精度を期待できるか把握することは、独立検証の妥当性を保証するために必須である。

Table 2 実測値を基準とした独立検証ソフトウェアの計算値の相違

対象部位	全脳	乳房	食道	全骨盤
対象門数 [門]	6	22	23	29
平均値±2標準偏差 [%]	0.26±0.27	0.32±0.60	0.08±1.30	0.12±0.95

【評価基準の設定方法】

MU独立検証における評価基準を設定することは、適切にエラーを検出するために重要である。今回のアンケートでは、評価基準の設定方法として、「ガイドライン記載、文献記載の値を用いている」が38%、「自施設で解析した値を用いている」が46%であり、多くの施設でこのいずれかの方法が採用されていた。ここでは、これらの方法の特徴や注意点を述べる。いずれの方法を採用するにしても、MU独立検証で検証対象となる“RTPSによって計算されたMU値”は、設定する条件によって変化し得ることに注意しなければならない。したがって、評価基準を決定するためには、まず始めに大前提となるRTPSにおける線量計算の条件を明確に定める必要がある。

評価基準を設定する前に

RTPSの線量計算に影響を与える因子としては、線量計算の場合、および不均質補正の有無が挙げられる。Clarkson法による計算値と比較する際、それぞれの因子がどのように影響するか詳しく説明する。

・線量計算の場合

Clarkson法では、十分な大きさの様な水に対して、垂直なビームが入射すると仮定した線量計算が行われる。一方、RTPSを用いた臨床では患者のCT画像上で線量計算される。患者の身体は、もちろん様な水ではないし、体表は局面である。ビームも垂直に入射するとは限らない。また、体表に近い病変を照射する場合には組織欠損が生じ、Clarkson法による計算値との乖離の原因になる可能性がある。

・不均質補正

先述したようにClarkson法では、様な水に対する照射と仮定されるため、不均質を考慮した線量計算は行われない。一方、RTPSを用いた臨床では、患者のCT画像に対して、Superposition/Convolution法相当以上の線量計算アルゴリズムを使用して、不均質を考慮した線量計算が行われることが多い。そのため、肺などの不均質領域を多く含む部位では、Clarkson法による計算値との乖離が生じやすい。この不均質補正は必要に応じてオフにすることも可能である。参考までにVarian Medical Systems社製Eclipse ver.13.6の線量計算アルゴリズムAAAにおける不均質補正の有無による線量分布の違いをFig.1に示す。

これらを踏まえると、RTPSにおける線量計算の条件は、大まかに3パターンに分けられる。1つ目は、患者CT画像で不均質補正(+)の線量計算を行うパターン1(臨床と同条件)。2つ目は、患者CT画像で不均質補正(-)の線量計算を行うパターン2。3つ目は、仮想水ファントムに置き換えて線量計算を行うパターン3 (Clarkson法と同条件)。独立検証ソフトウェアの線量計算アルゴリズムであるClarkson法と比較した場合、その相違の大きさは、パターン1>パターン2>パターン3のような傾向となる。このようにRTPSの計算条件によって、評価対象そのものが変化し得るため、MU独立検証の評価基準を決める前に、あらかじめ独立検証時におけるRTPSの計算条件を明確に定めておく必要がある。

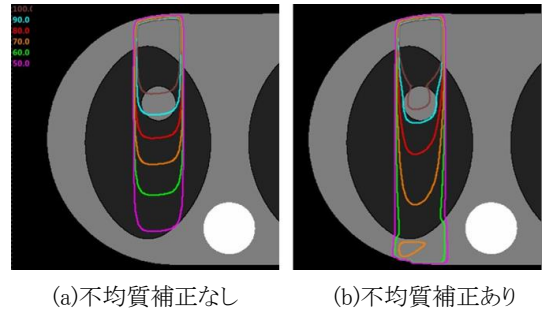


Fig.1 不均質補正の有無による線量分布の違い

ガイドライン・文献を参考にする方法

各種ガイドラインは、施設の方針を決める上で非常に有用であるが、残念ながら日本にはMU独立検証の評価基準について明確に定めたガイドラインは存在しない。多くの施設では、American Association of Physicists in Medicine (AAPM) が発刊しており、MU独立検証について論じた最も有名なガイドラインである Task Group 114 Report¹⁾を参考にしていると推測される。このレポートでは、不均質補正の有無や線量計算アルゴリズムの違い、線量計算ジオメトリの違いなど、様々な状況に応じた評価基準が提供されている。ただし、このレポートで示された評価基準は、多施設試験などによる手法で定量的に算出された値ではなく、執筆メンバーの総合的な経験と期待値などのコンセンサスに基づいたものであることに注意しなければならない。したがって、文献値を鵜呑みにするのではなく、自施設にも適応可能であるか確認する必要がある。なお、AAPMの Task Group Reportはフリーアクセスとなっているので、詳細については文献を参照されたい。

自施設の過去データから決定する方法

自施設のデータから評価基準を設定する方法としては、過去の独立検証データが正規分布に則ると仮定し、その平均値±2標準偏差を評価基準とする考えが広く用いられている。この区間にはデータ全体の約95%が含まれるとされ、これを逸脱した場合に「いつもと違う」という判断を下す。この方法の利点としては、照射部位毎に評価基準を設定できることが挙げられる。放射線治療は、照射野の形状や病変の深さなど、照射部位によってある程度の傾向が存在するため、照射部位毎に評価基準を設定することで、よりきめ細やかなエラーの検出が期待できる。当院における照射部位別のMU独立検証の結果(RTPSによる計算値を基準とした独立検証ソフトウェアによる検証値の相違)をFig.2に示す。Varian Medical Systems社製Clinac iXで施行された通常照射を対象とし、ビーム門数は全脳が48、頸部が85、乳房が185、食道が204、肺が216、腹部が259、骨盤部が276門であった。RTPSでは先述したパターン1の条件で線量計算を行い、独立検証ソフトウェアではClarkson法による線量計算を行った。腹部や骨盤部と比較して、乳房や肺では組織欠損や不均質領域の影響を顕著に受けるため、マイナス側に分布しており、照射部位毎に異なる傾向が確認できる。

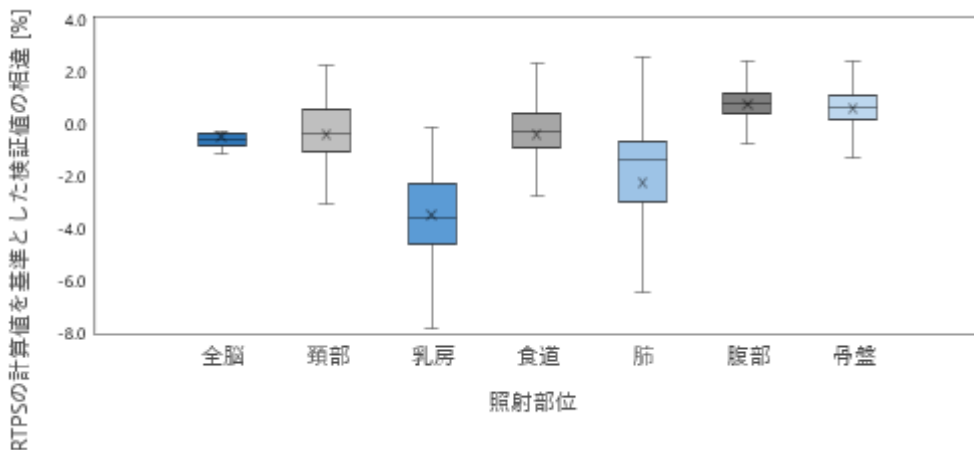


Fig.2 照射部位別MU独立検証

自施設における過去データから評価基準を設定する方法にもいくつか注意点がある。過去データの傾向を利用するということは、見方を変えれば“系統誤差を許容する”ということである。独立検証ソフトウェアによる計算値が正しければ、その系統誤差は照射部位による傾向を表していると判断できるが、そもそも独立検証ソフトウェアの計算値に誤りがあれば、そのエラーを上乗せした系統誤差を許容することになってしまう。それでは安全性を高めるという独立検証の目的が達成できるとは言い難い。したがって、この方法を採用する際には、より慎重なコミショニングを行い、独立検証ソフトウェアの精度をしっかりと確認することが重要となる。また、RTPSの新規導入や更新に伴い、線量計算アルゴリズムが変更された場合には、データの傾向が変化する可能性があるため、改めてデータを蓄積して確認する必要がある。

【福島医大における臨床運用】

当院におけるMU独立検証は、医学物理士によるプランチェックの一貫として実施され、原則として患者に照射される前に通常照射の全例について行われている。当院では、2016年1月よりアールテック社製MU CHECKを使用している。MU CHECKでは、RTPSからDICOM出力されたプラン情報(RT-PLAN)を読み込むことで治療ビームのパラメータを取得でき、RTPSで算出された水等価深の手入力のみで、効率的な検証を実施できる。強度変調放射線治療などの特殊照射の計算には対応していないが、放射線治療技術の標準²⁾に準拠したシンプルな仕様となっている。RTPSとは独立した計算を行う上で、ユーザーが内部動作を理解しやすいシンプルさは、独立検証ソフトウェアの重要な要件の1つである。

当院のMU独立検証では、先に述べた通り、臨床とすべて同条件でのRTPSによる計算値とClarkson法による検証値の比較を行っている。この比較の場合、得られる相違は大きくなる傾向にあるが、独立検証の目的は相違をゼロにすることではなく、あくまでも“エラーを検出すること”という基本方針のもとで実施している。評価基準は、照射部位毎に個別に設定したいところではあるが、現状では組織欠損の影響が顕著な乳房の接線照射のみ平均値±2標準偏差で-5.5~0.3%としている。不均質領域や組織欠損の影響を大きく受けるであろう他の部位に関しては、喉頭は症例数が少ないこと、肺は縦隔を含む割合によって傾向が変化するため、その切り分けが難しいこと等の理由により個別の設定はしていない。乳房以外の部位は、MU値の大きさ別に設定しており、①30MU以上では±3%、②10-30MUでは±5%、③10MU未満では±10%としている。これらはデータ蓄積前に暫定的に定めたものであるが、①について、乳房を除く30MU以上のビームにおける検証結果2927例で妥当性を確認したところ、平均値±2標準偏差が-0.3±3.7となったため、わかりやすく、かつ安全側の評価になるように現在も±3%を評価基準としている。②③については、小さいMU値の比較の場合、僅かな差であっても見かけ上、大きな相対誤差として表される場合があるため、MU値の大きさに応じた設定としている。TG-142では、小さいMU値を扱う場合、相対誤差[%]ではなく、絶対誤差[MU]による比較を推奨しているが、当院では単位を揃えた運用にするために相対誤差[%]に統一している。

MU独立検証で評価基準を逸脱した場合には、まず2次元半導体検出器であるSunNuclear社製MapCHECKを用いた相対線量分布検証を行う。このとき2%/2mmのガンマパス率90%以上を合格としている。さらに、ここでも評価基準を逸脱した場合には、電離箱線量計PTW社製SemiflexとToughwaterファントムを用いた絶対線量検証を行い、±3%以内を評価基準としている。

【最後に】

本稿ではソフトウェアを用いたMU独立検証について焦点をあてたが、独立検証の目的は、放射線治療における予期せぬエラーを検出し、治療の安全性を高めることである。したがって、ソフトウェアの導入に拘らず、各施設の状況に応じた手法で独立検証システムを構築することが重要である。本稿が独立検証システム、および評価基準を再考するに当たって、少しでも参考となれば幸甚である。

【参考文献・図書】

- 1) Stern RL, et al. : Verification of monitor unit calculations for non-IMRT clinical radiotherapy, report of AAPM Task Group 114. Med Phys. 38(1), 504-530, 2011.
- 2) 放射線治療技術の標準 日本放射線治療専門技師認定機構監修 日本放射線技師会出版会