資料

論文受付
2018年12月27日

論文受理
2019年6月10日

Code No. 814

三次元半導体検出器の経時的感度変化の検討

松本賢治 大塚正和 西垣外尚弘 雑賀貴大

近畿大学病院中央放射線部

緒言

現在、放射線治療において、特に頭頸部および前立腺がんの治療では Volumetric-modulated arc therapy (VMAT) が広く使われているようになってきている^{1,2)}。VMAT の線量分布の照射精度は、エネルギー、線量率、ガントリ速度、multi leaf collimator (MLC) 位置およびコリメータ角度に依存する^{3~5)}。VMAT は線量分布の形成の自由度が高いため、ターゲット線量を担保したまま周辺のリスク臓器に対する線量を低減することが可能である。しかしながら、VMAT は上記のガントリ速度等の機械的精度が担保されていなければならぬため、それぞれの治療計画の線量検証 (patient

specific quality assurance (QA)) を実行することによって、計画的に線量分布の確認が必要となる^{6~8)}。Patient specific QA は、通常は治療の前に実施され、測定により得られた線量と計算線量の一致を確認する。一般的に、線量分布の測定にはガフクロミックフィルム、electric portal imaging device (EPID)、二次元もしくは三次元配列検出器等が用いられ、絶対線量の一点測定には電離箱が用いられる^{9~19)}。線量分布の解析には通常、線量分布の解析手法である γ 解析が用いられる。 γ 解析では、解析に用いる距離 (mm) および線量 (%) の criteria を任意に変更することによって、線量および距離の差を合成した形で評価を行うこ

Study of Stability and Sensitivity of Three-dimensional Diode Array Detector

Kenji Matsumoto,* Masakazu Otsuka, Naohiro Nishigaito, and Takahiro Saika

Department of Central Radiology, Kindai University Hospital

Received December 27, 2018; Revision accepted June 10, 2019

Code No. 814

Summary

Purpose: Intensity modulated radiation therapy (IMRT) has become a widely accepted and efficient treatment technique for many types of cancers. Patient's specific quality assurance (QA) should be performed with QA devices. Stability and sensitivity tests conducted on the ArcCHECK (AC) 3D diode array were performed. **Methods:** Set-up error test with AC was performed. The set-up position moved to lateral (mm), longitudinal (mm) and rotational ($^{\circ}$) were 0.5, 1.0, 2.0 and 3.0, respectively. Sensitivity change test of diode array with AC through 230 days was also performed. Same array calibration data was applied to all measurements of volumetric-modulated arc therapy benchmark test through 230 days. Gamma method (2 mm/2% criteria) was performed to analyze the result of all measurements. **Results:** In the results of positional error, gamma pass rate become degenerate according to positional error became larger. With 0.5 mm or 0.5° positional error, decreasing rate of the pass rate of lateral, longitudinal and rotational were 1.0%, 2.5% and 4.2%, respectively. In the sensitivity change test, the gamma pass rate decreased 2.2%/100 days with same calibration data. **Conclusion:** AC has highly sensitivity against positional error. Sensitivity of AC has been changed and pass rate was decreased 2.2%/100 days through 230 days. Array calibration should be performed in consideration of change of sensitivity.

Key words: ArcCHECK, array calibration, gamma pass rate, diode array

*Corresponding author

Fig. 1 The images (a and b) from reference citation No. 24.
 (a) Image of three-dimensional diode array, ArcCHECK[®]. (b) Image with Multi plug[™] acryl insert.
 (c) Moving directions in Method 1-2-1 are shown with ArcCHECK.

とが可能である²⁰⁾.

ArcCHECK[®] (Sun Nuclear corporation, Melbourne, FL, USA) (以下, AC) は, 線量分布検証用の三次元配列の半導体検出器である. AC を用いて正確に線量分布を測定するためには, 正確な測定位置へのセットアップおよび定期的な半導体の array calibration が重要となる²¹⁾. 測定にはさまざまなスタッフが係わることになるが, セットアップ位置誤差の影響がどの程度測定の結果に影響するのかを把握することは重要である²²⁾. また, array calibration は一年に一度実施することがベンダから推奨されている²³⁾. しかし, その頻度で十分であるかもしくは, 半導体の経時的な感度変化に関する報告はされていないのが現状である. 半導体検出器の感度変化がどのように測定結果に影響するかは不明であり, array calibration の実施頻度を把握することは, IMRT の事前検証の結果を正しく評価するうえで非常に重要であるといえる.

今回, われわれは AC の基本的な特性として位置誤差の影響を検討した. それを踏まえたうえで, 同一の照射条件における pass 率の経時的な変化を評価し, 半導体素子の感度変化を踏まえた array calibration 実施の重要性を検討したので報告する.

1. 方法

1-1 使用機器

三次元半導体検出器には AC model 1220 を用いた. AC は, 1386 個の半導体素子が 10 mm の間隔で配置された円筒状のアクリルファントムで, 半導体のサイズは 0.8×0.8 mm である. 入射する X 線の照射領域に対して測定密度を増加させるために, 半導体素子は直径 21 cm の円筒型ファントムの全体に, 螺旋状に半導体が配置されている. 中心部分は空洞となっており, 付属の acryl insert (Multi plug[™]) を用いることによって電離箱線量計およびフィルムを用いた同時測定が可能となっている (Fig. 1)²⁴⁾.

外部照射装置には TrueBeam (Varian Medical systems, Palo Alto, CA, USA) を使用し 10MV-X 線を用いて検討を行った. 線量分布の解析には解析ソフトウェアである SNC patient (Sun Nuclear corporation, Melbourne, FL, USA) を用いて γ 解析による解析を行った. γ 解析に用いる criteria は, AC を用いた γ 解析での使用では 3%/2 mm が推奨されているが, 今回は検出感度を高くするため 2%/2 mm を採用した²⁵⁾. また, 線量分布の比較は絶対線量での比較方法を採用し, 米国医学物理学会 (American Association

Fig. 2 The graphs show the results of Method 1-2-1. Change of DTA pass rate against 0.5, 1.0, 2.0 and 3.0 mm lateral table shift (a), longitudinal table shift (b), and (d) vertical table shift are shown. (c) The graph shows the change of DTA pass rate against 0.5, 1.0, 2.0 and 3.0° gantry angle changes.

of Physicists in Medicine: AAPM) TG-218 の推奨に従い γ 値の計算には global normalization を用いた²⁵⁾。

1-2 測定方法

1-2-1 測定位置精度の影響の測定

AC の array calibration は、さまざまな測定位置に AC を移動し固定照射を行わなければならない。Array calibration を正確に実行するためには正確な設置位置精度が重要であると考えられるが、固定照射における AC の測定精度は明らかではない。われわれは、初めに AC の固定照射に対する設置精度の影響を検討した。AC をリニアック寝台上に配置し、アイソセンターに対して AC の幾何学的中心が一致するように設置した。空洞部分には acryl insert を挿入し通常の線量検証と同様の幾何学的配置となるように設定した。絶対線量評価とするために事前に dose calibration を実施した。測定時の条件は、gantry 角度: 0.0°, X 線エネルギー: 10 MV, 照射 monitor unit (MU) 値: 100 MU とした。測定項目を以下に示す。

- ・ 左側方向へ couch 位置をそれぞれ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 mm 移動し測定
- ・ 頭側方向へ couch 位置をそれぞれ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 mm 移動し測定
- ・ 前後方向へ couch 位置をそれぞれ ± 0.5 , 1.0, 2.0, 3.0 mm 移動し測定

- ・ Gantry 回転角度を CW 方向へそれぞれ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0° 回転し測定

AC に対する移動の方向を Fig. 1c に示す。測定結果は、distant to agreement (DTA) 法および γ 解析を用いて、 γ 解析の pass 率の変化を検討した。

1-2-2 Array calibration の影響の測定

AC の半導体素子の経時的な感度変化を評価するため、1 カ月に 2~3 回の頻度で benchmark テストを実施し γ 解析の pass 率の評価を実施した。Array calibration は、初回の測定時に実施し、それ以降の測定には同じ array calibration データを使用した。Benchmark に使用する VMAT プランは、上咽頭がんの治療計画を匿名化したものを採用した。Benchmark テストの照射条件は、jaw tracking, 10MV-X 線、照射範囲は頭尾方向に約 20 cm である。測定時には、方法 1-2-1 と同様に絶対線量測定のために dose calibration を毎回実施し絶対線量による γ 解析の pass 率の評価を行った。解析対象期間は 230 日とした。

2. 結果

2-1 測定位置精度の影響の測定結果

各測定位置での DTA および γ 解析の γ 解析の pass 率の変化を Fig. 2 および 3 に示す。 γ 解析における解析結果では、左側方向は 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 mm で

Fig. 3 The graphs show the results of Method 1-2-1. Change of gamma pass rate against 0.5, 1.0, 2.0 and 3.0 mm lateral table shift (a), longitudinal table shift (b) and (d) vertical table shift are shown. (c) The graph shows the change of gamma pass rate against 0.5, 1.0, 2.0 and 3.0° gantry angle changes.

それぞれ 1.0, 4.6, 12.0, 18.9%の γ 解析の pass 率低下となった。頭側方向では 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 mm でそれぞれ 2.5, 9.4, 18.3, 20.7%の γ 解析の pass 率低下となった。前後方向では, 3.0, 2.0, 1.0, 0.5, -0.5, -1.0, -2.0, -3.0 mm の移動量に対し, 3.1, 1.4, 1.0, 0.5, 1.0, 2.2, 3.4, 5.0%の γ 解析の pass 率低下となった。ガントリ回転では, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0° の回転でそれぞれ 3.9, 4.2, 15.9, 22.3%の γ 解析の pass 率低下となった。最小の移動量の条件下では, 測定結果に最も大きく影響を与えたのは回転精度であり, 0.5° の設置位置の違いで約 4.0%の γ 解析の pass 率の低下が生じる結果となった。次いで頭側方向の影響が大きく 0.5 mm の位置の違いで 2.5%の γ 解析の pass 率の低下が生じた。左側方向の設置位置精度は, 最も影響が小さく, 0.5 mm の位置の違いは 1.0%の γ 解析の pass 率の低下につながる結果であった。また, DTA の解析結果は総じて γ 解析と同様の傾向を示した。位置誤差に対する pass 率の減少の割合は γ 解析に比べて大きくなる結果であった。

2-2 Array calibration の影響の測定結果

Benchmark の γ 解析の pass 率の変化を Fig. 4 に示す。 γ 解析の pass 率は, 時間の経過に伴い直線的に減少する結果を示した。評価開始から 230 日後で γ 解析の pass 率は 96.7%から 91.4%の低下を示した。 γ

解析の pass 率はおよそ 2.2%/100 日の割合で変化し, 素子の感度が低下する傾向が確認された。一定の γ 解析の pass 率低下の傾向を確認した後, 臨床の事前検証結果への影響を鑑み, array calibration を実施した。Array calibration 後には, benchmark のパス率は, 97%台に上昇した。

3. 考 察

今回われわれは, AC の測定時の設置位置の影響および半導体素子の経時的感度変化を検討した。設置位置の検討では, AC は設置位置のエラーに対して非常に高い感度をもつことが示された。設置位置に 0.5 mm のずれが生じた場合, 10×10 cm のオープン照射野で 1.0-2.5%のパス率の低下につながる結果であった。また, 0.5° の回転が生じた場合は, 3.9%と非常に大きな γ 解析の pass 率の低下となり, 測定時の設置位置の精度は測定結果に大きく影響することが確認された。したがって, AC の使用時には, セットアップを複数人で行い設置位置の確認作業が重要となる。検証結果が各施設の判定基準を満たさない場合に, 再度設置位置の確認作業を行うことはユーザがもっておかなければならない基礎的な知識であると考えられる。また, array calibration の実施時においても, AC の設置位置を何度か変更する必要がある作業が発生するため, 同様に複数人で実施しなければならない。

Fig. 4 The graphs show the results of Method 1-2-2.
All results of gamma pass rate were measured with same calibration data through 230 days.

ACの半導体素子の経時的な感度変化が γ 解析のpass率に影響することが確認された。同一のarray calibrationデータを用いてbenchmarkのテストを実施した結果、 γ 解析のpass率は経過時間に対して直線性を示し、その変化は100日で2.2%の低下であった。ACのarray calibrationの手技は非常に時間のかかる行程が必要であり、照射および品質管理業務との時間調整は必要となるが、100日で約2.0%の γ 解析のpass率低下を考慮し定期的なarray calibrationの実施が必要である。今回の検討期間は230日であったが、期間内のACの使用頻度はIMRT線量検証の件数で5件/1週程度であった。概算ではあるが、ACに照射された線量は、7000 MU/週であった。AAPM TG-62で述べられているように、半導体素子には2 MeV以上のエネルギーで1000 Gy以上の照射がされた場合に放射損傷によって感度変化が生じるとされている²⁶⁾。ACに搭載されている半導体素子も同様に経年使用に伴う放射損傷による感度変化が生じた結果、pass率の低下につながることを確認された。

使用頻度によって感度変化の程度は変わる可能性があるため、各施設で定期的にbenchmarkを実施し設置精度ならびに感度変化の把握をすることが重要である⁸⁾。

AAPM TG-218等では、統計的工程管理(Statisti-

cally process control: SPC)を用いたIMAT検証結果の評価方法を推奨しているが、半導体素子の感度変化のバイアスがかかった検証結果では管理限界値の算出が困難であり正確な管理図作成はできない²⁵⁾。これらの解析手法を実践するためにも半導体素子の感度変化を考慮したarray calibrationの定期的な実施が不可欠である。

4. 結 語

ACは位置精度に対して高い感度をもつことが確認された。ACのarray calibration時には、測定位置の移動を行わなければならないため、設置位置の精度が重要となる。ACの半導体素子は、経時的に感度変化をすることが確認された。Array calibration後100日の経過(平均のVMAT検証数5件/週)で γ 解析のpass率は約2.2%低下する。正確な線量分布評価のためには、定期的にbenchmarkテストを行い半導体素子の感度変化に注意する必要がある。ACの感度の経時の変化を考慮したarray calibrationの実施が重要である。

利益相反

筆頭著者および共著者全員が開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) Chow JC, Jiang R. Prostate volumetric-modulated arc therapy: dosimetry and radiobiological model variation between the single-arc and double-arc technique. *J Appl Clin Med Phys* 2013; 14(3): 3-12.
- 2) Gorayski P, Fitzgerald R, Barry T, et al. Volumetric modulated arc therapy versus step-and-shoot intensity modulated radiation therapy in the treatment of large nerve perineural spread to the skull base: a comparative dosimetric planning study. *J Med Radiat Sci* 2014; 61(2): 85-90.
- 3) Bedford JL, Warrington AP. Commissioning of volumetric modulated arc therapy (VMAT). *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2009; 73(2): 537-545.
- 4) Ling CC, Zhang P, Archambault Y, et al. Commissioning and quality assurance of RapidArc radiotherapy delivery system. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2008; 72(2): 575-581.
- 5) García-Vicente F, Fernández V, Bermúdez R, et al. Sensitivity of a helical diode array device to delivery errors in IMRT treatment and establishment of tolerance level for pretreatment QA. *J Appl Clin Med Phys* 2012; 13(1): 111-123.
- 6) Low DA, Moran JM, Dempsey JF, et al. Dosimetry tools and techniques for IMRT. *Med Phys* 2011; 38(3): 1313-1338.
- 7) Schreibmann E, Dhabaan A, Elder E, et al. Patient-specific quality assurance method for VMAT treatment delivery. *Med Phys* 2009; 36(10): 4530-4535.
- 8) Mynampati DK, Yarpalvali R, Hong L, et al. Application of AAPM TG 119 to volumetric arc therapy (VMAT). *J Appl Clin Med Phys* 2012; 13(5): 108-116.
- 9) Iori M, Cagni E, Paiusco M, et al. Dosimetric verification of IMAT delivery with a conventional EPID system and a commercial portal dose image prediction tool. *Med Phys* 2010; 37(1): 377-390.
- 10) Vial P, Greer PB, Hunt P, et al. The impact of MLC transmitted radiation on EPID dosimetry for dynamic MLC beams. *Med Phys* 2008; 35(4): 1267-1277.
- 11) Dobler B, Streck N, Klein E, et al. Hybrid plan verification for intensity-modulated radiation therapy (IMRT) using the 2D ionization chamber array iMRT MatriXX—a feasibility study. *Phys Med Biol* 2010; 55(2): N39-55.
- 12) Petoukhova AL, van Egmond J, Eenink MG, et al. The ArcCHECK diode array for dosimetric verification of HybridArc. *Phys Med Biol* 2011; 56(16): 5411-5428.
- 13) Mayer RR, Ma F, Chen Y, et al. Enhanced dosimetry procedures and assessment for EBT2 radiochromic film. *Med Phys* 2012; 39(4): 2147-2155.
- 14) Li G, Zhang Y, Jiang X, et al. Evaluation of the ArcCHECK QA system for IMRT and VMAT verification. *Phys Med* 2013; 29(3): 295-303.
- 15) Yue Q, Duan J, Li R, et al. Systematic analysis of the ArcCheck diode arrays for tomotherapy delivery verification. *Int J Med Phys Clin Eng Radiat Oncol* 2014; 3(4): 218-225.
- 16) Song JH, Shin HJ, Kay CS, et al. Dosimetric verification by using the ArcCHECK system and 3DVH software for various target sizes. *PLoS ONE* 2015; 10(3): e0119937.
- 17) Cusumano D, Fumagalli ML, Ghielmetti F, et al. Sum signal dosimetry: A new approach for high dose quality assurance with Gafchromic EBT3. *J Appl Clin Med Phys* 2017; 18(2): 181-190.
- 18) Moliner G, Sorro L, Verstraet R, et al. Assessment of combined use of ArcCheck® detector and portal dosimetry for delivery quality assurance of head and neck and prostate volumetric-modulated arc therapy. *J Appl Clin Med Phys* 2018; 19(6): 133-139.
- 19) Feygelman V, Zhang G, Stevens C, et al. Evaluation of a new VMAT QA device, or the “X” and “O” array geometries. *J Appl Clin Med Phys* 2011; 12(2): 146-168.
- 20) Low DA, Harms WB, Mutic S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. *Med Phys* 1998; 25(5): 656-661.
- 21) Chaswal V, Weldon M, Gupta N, et al. Commissioning and comprehensive evaluation of the ArcCHECK cylindrical diode array for VMAT pretreatment delivery QA. *J Appl Clin Med Phys* 2014; 15(4): 212-225.
- 22) Li G, Bai S, Chen N, et al. Evaluation of the sensitivity of two 3D diode array dosimetry systems to setup error for quality assurance (QA) of volumetric-modulated arc therapy (VMAT). *J Appl Clin Med Phys* 2013; 14(5): 13-24.
- 23) Sun Nuclear Corporation. ArcCHECK User's guide, the ultimate 4D QA solution. 2009; 1-40.
- 24) Sun Nuclear Corporation. ArcCHECK The ultimate 4D QA solution, a 4D isotropical cylindrical detector array for arc delivery QA and dosimetry. 2012; 1-8.
- 25) Miften M, Olch A, Mihailidis D, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM Task Group No. 218. *Med Phys* 2018; 45(4): e53-83.
- 26) Yorke E, Alecu R, Ding L, et al. Diode in vivo dosimetry for patients receiving external beam radiation therapy: report of Task Group 62 of the Radiation Therapy Committee of the American Association of Physicists in Medicine. Medical Physics Publishing, 2005.

問合先

〒589-8511 大阪狭山市大野東 377-2
近畿大学病院中央放射線部 松本賢治