

5. DMLC による IMRT

東北大学医学部附属病院 岸和馬

はじめに

DMLC 法は、ビームオン中にリーフギャップとリーフ移動速度を連続的に調整することにより強度変調を行う方式である。SMLC に比べて滑らかな形状のフルエンスを比較的短時間に投与可能である。しかしながら、リーフ移動精度の良否が線量分布に影響するため、この手法に使用する MLC は優れた動作性能が求められる。

一方、ユーザーは線量分布や出力に影響するラウンド形状のリーフ先端やリークなどの MLC 固有の物理的特性や動作特性の理解が必要である。現状では、DMLC-IMRT が行えるシステムは、バリアン社のリニアック及び治療計画が主流であるため、以下、バリアン社 MLC 及び治療計画装置 CADPLAN/Helios に関する内容に限定する。また、患者データの検証については、SMLC 法とほぼ同様であるため詳細は省略し、DMLC 固有の特性とその QA について述べる。

1. 使用機器

治療装置は Clinac23EX(Varian 社製)で、6MV と 15MVX 線を対象とした。装備する MLC は、アイソセンタでのリーフ幅が 5mm 幅(20cm)および 10mm 幅リーフ (両サイド 10cm) を持つ Millennium MLC120(Varian 社製)である。治療計画装置は、Cadplan/Helios Ver3.6.2(Varian 社製)を用いた。臨床フィールドとして、検討の対象にした Intensity modulated フィールド(=IM フィールド)を Fig.1 に示す。

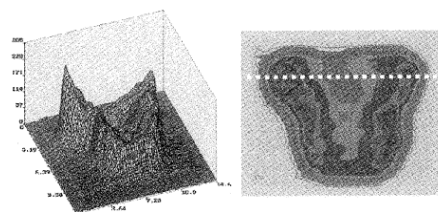


Fig.1 前立腺への IMRT の PA 方向のビーム

このフィールドは、前立腺の PA 方向の 1 門であり、高いピークを持ち、かつ強度の強弱をあわせもつ典型的な IM フィールドである。線量分布の評価については、フィルム法では微小な差が検出できないため、破線の部分のプロフィールをイオンチェンバーアレイ LA48(PTW)を用いて測定し、比較検討した。

2. LMC に関するパラメータ

リーフモーション・カリキュレータ(Leaf Motion calculator=LMC)は、CADPLAN/Helios によって最適化されたフルエンス(Optimized Fluence)から、リーフ・モーションを規定するリーフシーケンス(DMLC ファイル)と実動フルエンス(Actual Fluence)を作成するアプリケーションである。これらの作成は、リーフ位置トレランス、Dosimetric Leaf separation、線量率、リーフ移動速度などの MLC の特性を表す LMC パラメータと平均リーフトランスミッションを用いて行われる。入力する LMC パラメータが、治療装置に装備されている MLC の特性に合致していなければ、正確な実動フルエンスが作成されないため、実際の照射と異なった線量分布計算がなされる。したがって、これらのパラメータの入力は、DMLC による IMRT では非常に重要である。ここでは、各 LMC パラメータの解説と測定方法について述べる。

2-1 リーフ位置トレランス

リーフ位置トレランスは、DMLCファイルに基づいて、ダイナミックにリーフを移動する際のリーフ位置精度に関する許容値を規定するパラメータである。SMLCにおけるリーフ位置エラーはフィールドの辺縁線量が変化しただけであるが、照射中のリーフ動作によって強度変調するDMLCでは、このエラーはフィールド内の線量に影響を与えるため、リーフ位置精度はより重要となる。Fig.2 にギャップ幅0.5、1.0、2.0、3.0、4.0cmのsweeping window時のリーフ位置エラーが及ぼす線量エラ

一の関係を示すが、小ギャップ幅ほどその影響が大きい。トレランスが大きければ、リーフ位置を容易にトレランス内に保つことができるため、ビームが停止されることなくビームの投与が行われる。逆に、この値が小さければ、リーフ位置精度は高くなるが、瞬間的にビームを停止してトレランスを維持しようとするため、照射時間が延長する。この頻度は、低MU、高線量率ほど増加する。外見上、ビームのオン・オフは線量率が可変しているように見えるが、この現象はリーフ移動の不安定化を招き、設定したトレランス内に保持できない場合も生じる。したがって、照射時間及びリーフ位置エラーを考慮した設定が必要になる。

Fig.3は、臨床フィールドのDMLCファイル(線量率600MU/min、150MU)を用いて、トレランス値を変化させて求めた照射時間(Fig.3a)とその時のリーフ位置エラー(Fig.3b、1ペアのデータ)を示している。リーフ位置エラーの解析は、照射後にMLC Dialog File viewer(バリアン社)を用いて行った。治療時間はトレランスが1.5mm以上で一定となり、最小トレランス0.5mm時の約20%の治療時間が短縮できる。また、その時のリーフ位置エラーは約0.06mm悪化するが、これによるフィールド内の線量エラーはFig.2から1%以下(平均ギャップ幅2.8cm)で問題ない。したがって、必要以上に小さいトレランスを選択することは、治療時間が無用に延長することになるため、LoSassoら(2mm)も述べているようにトレランスは1.5~2mmの選択が妥当と考える²⁾。

2-2 平均MLCトランスミッション

DMLCによる投与中、開口部以外はリーフで覆われていることになり、全フルエンスの約5%がMLCトランスミッションによる寄与となる²⁾。したがって、平均MLCトランスミッションは、注意深く設定する必要がある。Fig.4は、深さとフィールドを変化させて、intraleafトランスミッションとinterleafリークの平均線量を測定し、オープンフィールドの線量に対する比を求めたグラフである。

6MV、15MV両エネルギーとも、フィールドサイズが大きくなるほどトランスミッションが高くなる傾向がある。この変化は、フィールドの増大により、intraleaf部の散乱線量が増加するためと考えられる³⁾。また、15MVは深さが変化してもほぼ一定の値となるが、6MVはMLCによるビームハードニングの影響が強いため、深さが増すごとに増加する²⁾。このパラメータは、CADPLANのトランスミッションの規定に準じるものと考え、最小フィールド(3×3cm)、 d_{max} での測定データとなる。当院では、測定上の問題から、6MVで深さ5cm、15MVで深さ7cmにおけるフィールド5×5cm²の測定値を採用している。

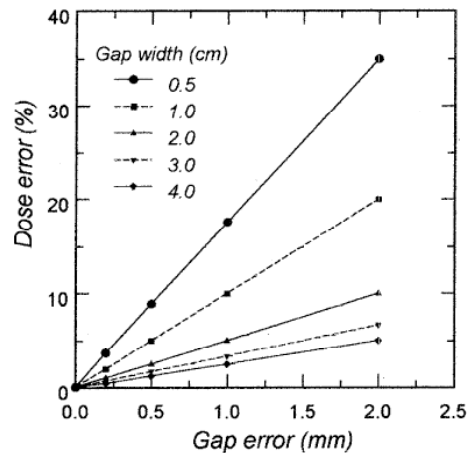


Fig.2 ギャップ誤差の線量誤差への影響

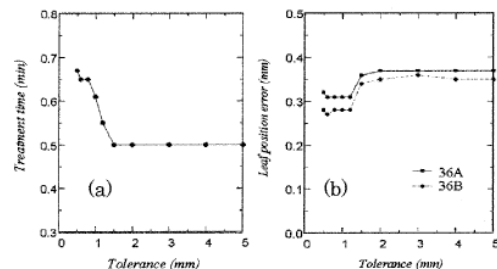


Fig.3 典型的な前立腺IMRT (PA 方向) のIFフィールドにおける治療時間(a)とリーフ位置誤差(b)へのトレランス値の影響。

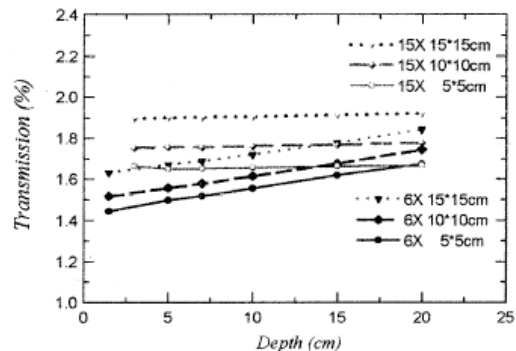


Fig.4 6MV、15MVのX線の平均MLC透過率。

2-3 リーフエンド・トランスミッション

バリアン社のMLCの先端はラウンド形状であるため、全閉時でもリーフ先端から線量の透過が生じる。このリーフ先端部からの透過をリーフエンド・トランスミッション(=LET_r)と呼んでいる。LoSassoらは、リーフエンドが中心軸に位置しているときのリーフ先端から距離に対するLET_rは、Fig.5(矢印)のような曲線となり、仮に、このリーフが全閉状態でsweepingした時のLET_rによる線量の増加は、理想的なリーフエンド形状のMLCの約1mm/片リーフの開度(実効リーフ開度：長方形の部分)に相当するとしている²⁾。ダイナミックな照射中、このトランスミッションは常にフィールド内に線量を加算することになる。当然ながら、リーフ位置によってLET_rは変化するため、リーフ位置に対するLET_rの関数をモデル化して、MLCのリーフシーケンスに反映させることが理想的であるが、現状では実効リーフ開度により補正を行っている。

この開度をLoSassoはリーフギャップ・オフセット(Leaf gap offset)²⁾、Arnfieldは、等価リーフシフト(Equivalent leaf shift)³⁾、LMCパラメータではドジメトリックリーフ分離(Dosimetric leaf separation)と呼んでいる(以下、各用語をL.G.O、E.L.S、D.L.Sと表記する)。L.G.OとD.L.Sは両リーフの合計値だが、E.L.Sは片側のリーフに対する値を示す。したがって、これらには次のような関係がある。

$$D.L.S = L.G.O = E.L.S \times 2$$

この補正の程度による影響を明確に示したのが、Fig.6である。上部は、臨床フィールドにおいてD.L.Sを0、2、4mmとした時の各プロフィールで、下部は補正しない時(D.L.S=0)に対するD.L.S2、4mmのときのプロフィール差を示す。仮にD.L.Sが2mmの場合、これを補正しなければ、最大15%ものエラーを招くことになる。D.L.Sの測定法として代表的なものは、LoSassoの固定MLCによる測定法と、ArnfieldのSweeping windowによる方法がある。ここでは、ArnfieldのE.L.Sを求める方法を示す。

2-3-1 E.L.Sの算出原理とその測定法

Arnfieldは一定のギャップ幅を移動させながら照射するSweeping windowを用いてE.L.Sを計算式から求める方法を報告している。10×10cm²フィールド内を0.5cm~10cmの8種類のギャップ幅で30MUを与えるSweeping windowのDMLCファイルを作成する。各DMLCファイルにおける全ビームオンタイムは、630~60MUになる。絞り開度は10×10cm²、interleafリークを考慮するため、リーフの移動方向に垂直にイオンチェンバーを配置して、中心軸上深さ5cmにおける平均線量(実効開度線量： M_{eff})を測定する。Arnfieldは、Sweeping windowによる投与線量は、ギャップ、MLCトランスミッション、リーフエンド・トランスミッションからの寄与から成り、(1)式が成り立つと仮定した。3成分に分解して表記すると(2)式となる。

$$M_{eff} = \left(M_{eff} + \frac{2\delta R}{60V} \right) (1-L) + M_{total} L$$

$$M_{eff} = M_{open} + L(M_{total} - M_{open}) + \frac{2\sigma R}{60V} (1-L)$$

Calculation of Leaf End Transmission

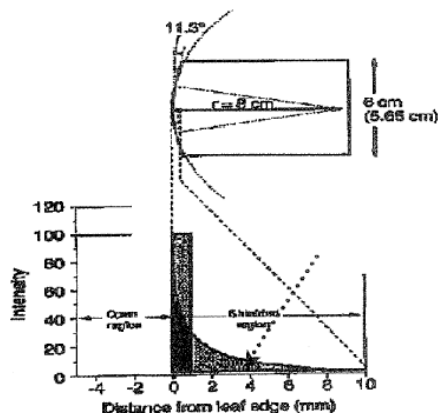


Fig.5 LoSasso 等の計算によるリーフ端透過率。

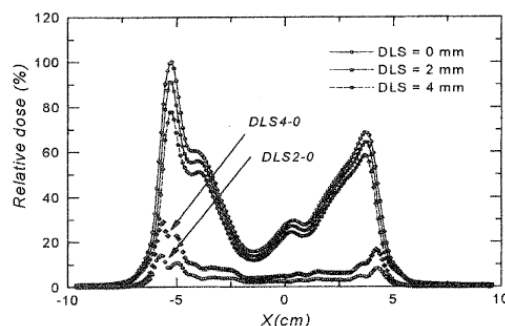


Fig.6 Dosimetric leaf separation 補正の影響。

ここで、 M_{eff} : 実効開度線量 (MU)、 M_{open} : 公称開度線量 (30MU)、 M_{total} : 全ビームオンタイム (630~60 MU)、 V : リーフ速度 (cm/sec)、 L : 平均MLC透過率 (%)、 δ : E.L.S (cm)、 R : 線量率(MU/min)である。フィールド中心で測定した実効開度線量 (M_{eff}) はMU値に換算するか、 M_{eff} 、 M_{open} 、 M_{total} を線量値としなければならない。ギャップ幅に応じて、MLCトランсмисシオン、リーフエンド・トランсмисシオンからの寄与の比率が変化する。フィルム法を用いて、 M_{eff} を求めるArnfieldの原法は、測定精度を上げるのが難しいため、当院では0.6ccイオンチェンバーを用いた長さ24mmのこのイオンチェンバーは、約5リーフサイクル(幅5mmリーフの場合)をカバーできるので、interleafリークを含めた平均線量の測定ができると判断した。

2-3-2 E.L.Sの測定結果

Fig.7は、公称リーフギャップに対する M_{eff} の変化を示す。30MUに相当するリーフシーケンスで照射しても、ギャップからの1次線に加え、リーフトランсмисシオン、リーフエンド・トランсмисシオンの成分が付加されるため、 M_{eff} は30MUを超えるが、小ギャップほどこの傾向が大きい。(1)式から、各ギャップにおける δ (=E.L.S)を求め、Fig.8のように、横軸に公称ギャップ幅、縦軸にギャップ幅+2 δ をプロットし、一次近似関数を求める。この関数のy切片が平均化された2 δ (=D.L.S)となる。グラフから、当院の装置のX線6MV及び15MVにおける2 δ (=D.L.S)は、それぞれ1.6mmと1.8mmであった。

2-4 線量率とリーフ速度

LMCパラメータにおける線量率は、リーフ速度とともにDMLCファイルを作成する際のMLCの動作を規定する。したがって、線量率の入力値によって、異なるDMLCファイル(異なるMUファクター)が作成される。一般に、線量率とリーフ速度は治療装置の最大値を入力する。その場合、入力値と異なった線量率で治療を行ってもフルエンスに大差はない。ここでは、結果を示さないが、入力値を最小線量率にして、治療時に最大線量率を使用する場合は、リーフ位置エラーなどの問題が生じる場合がある。当院では、治療及び検証前に、治療に使用するMU値でDMLCファイルを動作させ、リーフ位置エラーが約0.5mm以下となるような線量率を選択している。

補足ながら、検証において、測定フィルムの感度の関係で、治療に使用するMU値と異なるMUを使用しなければならない場合がある。Fig.9は、MU150で治療するフィールドを30()、150、100、50と変化させて(見かけ上のリーフ速度が1/2、1、1.5、3倍となる)線量率一定で照射した場合のリーフ速度による線量プロフィールとリーフ位置エラーの変化を示す。プロフィールは、前出のDMLCファイルを用い、MU300時との差で表した。このDMLCファイルのMU300時のリーフ速度は、最大2.8cm/sec、平均0.3cm/secであり、平均リーフ位置エラーは0.36mmになる。速度3倍のMU50では、平均リーフ位置エラーは約4倍、線量差は最大4%に増加する。IMRTの線量検証の際、必要以上にMUを少なくすると、リーフ速度の増加による線量エラーを招く。

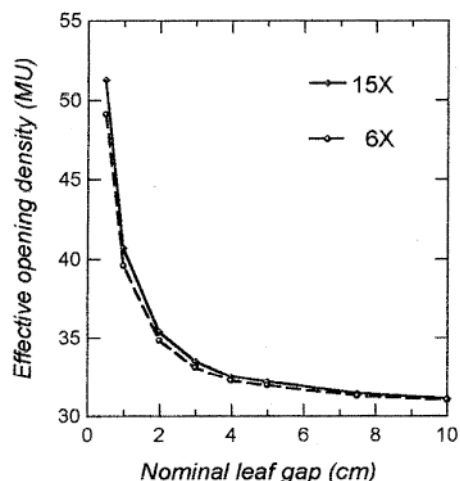


Fig.7 公称ギャップ幅に対する M_{eff} .

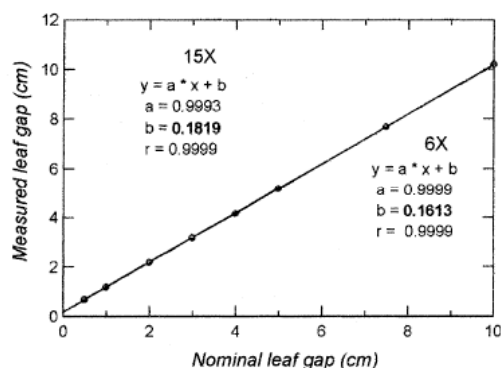


Fig.8 一次近似解析による D.L.S(=2 δ)の算出.

2-5LMCパラメータの確認

最終的に、CADPLANで計算された線量分布とMU値を実測により比較を行って、LMCパラメータの良否を総合的に判断する。この比較は、患者データの検証時の測定に準ずるが、具体的には、線量分布はフィルム法で、ポイント測定は小容積のイオンチェンバーにより行い、エネルギー、測定深などの条件を変えて比較検討する。

Fig.10は、CADPLAN/Heliosで計算したラインプロフィールと、LA48による実測のプロフィールの比較を行った結果である。プロフィールはほぼ±2%以内で合致した。フィルム法による比較は、その潜在的な測定誤差のためにLMCパラメータの良否が判断しにくいので、注意が必要である。

3. DMLCにおけるQA

日常のDMLCのQAは、IMRTプランを検証した時のマシンの状態を維持していくために非常に重要である。当院で行っているQA法とその頻度を以下に示す。

1. 光フィールドによるリーフ位置及び並行性のチェック(毎日)
2. MLCユーティリティによるモーターカウントのチェック(月1回)
3. リーフモータの劣化のチェック(週1回)
4. MLCキャリブレーションの安定性のチェック(週3回)

QAの方法や頻度は施設ごとに異なるが、ここではMSKCCで推奨している3及び4の方法を説明する。

3-1リーフモータの劣化⁴⁾

DMLC-IMRTにおいて、リーフモータは線量投与に直接影響する部品であり、リーフモータの異常の有無を常に把握しておく必要がある。このリーフモータの劣化の程度をチェックする方法は、1mm幅のギャップを2cm間隔で移動しながらフィルムに曝射し、リーフ位置のズレから視覚的に評価する手法である。このQAの意義は、劣化したリーフモータを早期に予測交換することで、治療中のMLCのトラブルを未然に防ぐことにある。注意すべき点は、視覚的に評価しやすい先鋭な画像を得るために低エネルギー、ビルドアップなしで曝射することである。MLCのイニシャライズはモータのエラーをキャンセルしてしまうため、このQA手順は、イニシャライズ後4時間以上経過した治療後などに行うことが肝要である。この測定により、視覚的評価で0.2mm以上のエラーの検出が可能

(Fig.11)で、ズレが大きいリーフモータは、速やかに交換する。この測定の頻度は、MSKCCでは2週に1回行うとしている。

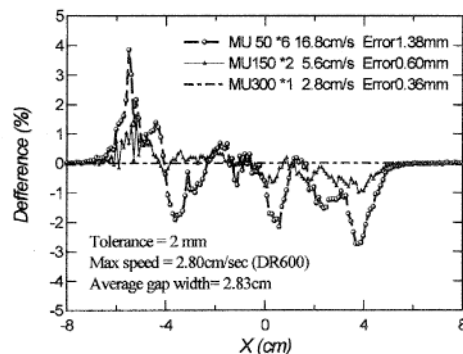


Fig.9 リーフ速度と位置誤差の変化.

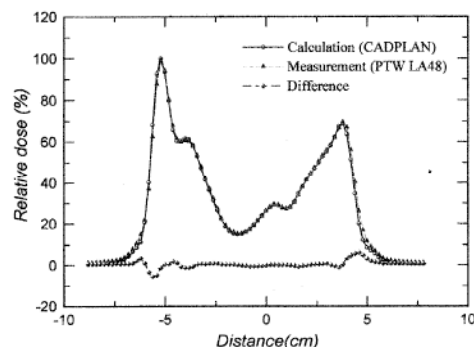
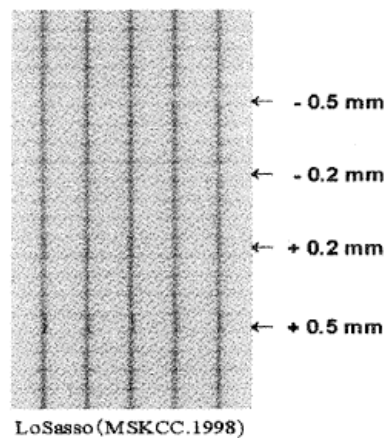


Fig.10 CADPLAN による計算と実測プロフィールの比較.



LoSasso (MSKCC, 1998)

Fig.11 1mm ギャップの移動曝射によるリーフモータの劣化視覚判定.

3-2 MLCキャリブレーション⁴⁾

MLCキャリブレーションが正常に機能して、初めて、高いリーフ精度が確保できる。以下、MLCキャリブレーションによるリーフ位置設定の長期安定性、特にキャリッジの長期安定性をモニタするための測定法を示す。

方法は、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ オープンフィールドに対する5mmギャップのSweeping windows照射時の出力比を測定する。具体的には、6MV、絞りサイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、0.6ccイオンチェンバーを用いて、Fig.12左の例のようにビルドアップ1.5cm、バックアップ10cm程度で行う。その線量比の変動をモニタすることによって、ギャップ幅の変位を検知できる。Fig.13はギャップエラーと線量比の変動の関係を示している。5%の線量比の変動は約0.3mmの変位に相当することから、線量比の変化からギャップ幅の変化を鋭敏に検出できることがわかる。現在、Fig.12右のようにシャドートレイタイプのファントムを用いてチェックを試みている。これにより、ガントリ角度を変化させた場合の測定も可能となった。Fig.14は、当院の約4ヶ月間の測定結果である(週5回)。約3ヶ月間 $\pm 1\%$ 以内で安定性していたが、約50回目の以降の測定で2%(0.1mm)の線量(ギャップ幅)の変化が起こった。この原因は、リーフバンクの傾きやリーフギャップエラーなどを規定するMLCXCALファイルの変更をしたためである。この期間は、IMRTを行っていない時期であったために問題は生じなかったが、MLCの調整を行った場合は、この計測により出力の変化がないことを確認する必要がある。この測定頻度はデータの恒常性が得られるまで連日行い、最終的に過に一回以上行う。我々は、この測定法を用いてリーフギャップエラーやリーフの平行性等の調整に利用している。

6. 結語

最適化されたフルエンスを忠実に投与方法として、DMLCは非常に有効な手法である。しかしながら、この手法はダイナミックにリーフが動くために、その特性の把握時非常に難解である。特に、リーフ位置エラーはSMLCではフィールドの辺縁線量に変化するだけであるが、DMLCではフィールド内の線量に影響を与えるため、リーフ位置精度はより重要となる。DMLCのQAにおいて非常に重要なことは、治療前の線量検証の結果を治療期間中に渡って維持していくことである。現状では、治療中のリーフの動作をリアルタイムにモニタする方法はなく、MLCのインターロック機構に依存しているのが現状である。したがって、日常のQAにおいては、リーフモータの劣化やMLCキャリブレーションの安

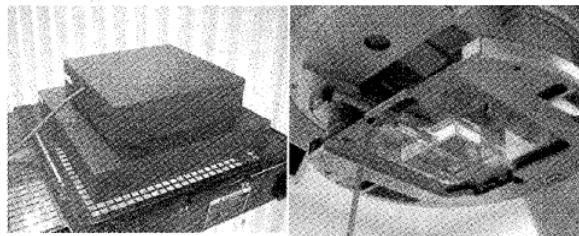


Fig.12 (左) 固体ファントムを用いた測定、(右) シャドートレイタイプのファントムを用いた測定。

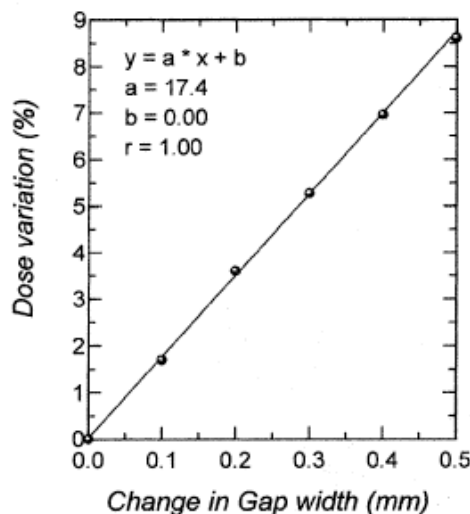


Fig.13 ギャップ誤差と出力比の関係。

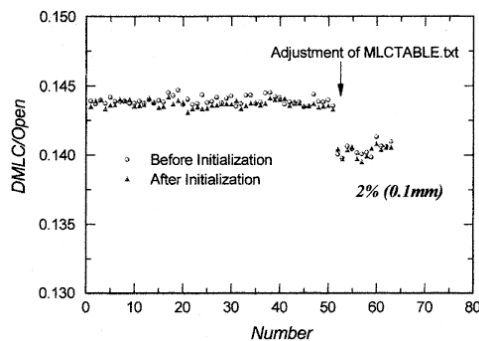


Fig.14 約4ヶ月間の出力比の変動。

定性等を定期的に確認することにより、MLCの機械的な変化を見逃さないようにしなければならない。今後のDMLCのQA手順の確立が望まれる。

謝辞

本発表の機会を与えていただきました放射線治療分科会会長及び委員の方々に感謝申し上げます。また、ご協力くださいましたバリアンメディカルシステムズ坂口氏、東洋メディック株式会社吉岡、加藤両氏、当放射線部スタッフに御礼申し上げます。

参考文献

1. Chen-Shou Chui, Spiridon Spirou, and Thomas LoSasso, “Testing of dynamic multileaf collimation,” Med. Phys. 23, 635-641 (1996).
2. Tomas LoSasso, Chen-Shou Chui, and C. Clifton Ling, “Physical and dosimetric aspects of a multileaf collimation system used in the dynamic mode for implementing intensity modulated radiotherapy,” Med. Phys. 25, 1919-1927 (1998).
3. Mark R. Arnfield, Jeffrey V. Siebers, Jong O. Kim, Qiuwen Wu, Paul J. Keall, and Radhe Mohan, “A method for determining multileaf collimator transmission and scatter for dynamic intensity modulated radiotherapy,” Med. Phys. 27, 2231-2241 (2000).
4. Thomas LoSasso, Chen-Shou Chui, and C. Clifton Ling, “Comprehensive quality assurance for the delivery of intensity modulated radiotherapy with a multileaf collimator used in the dynamic mode,” Med. Phys. 28, 2209-2219 (2001).