

論文の内容の要旨

論文題目

放射線治療における小照射野の線量評価

氏名

津田 政行

1. 研究目的

放射線治療に用いられている高エネルギーX線は、電子を加速して得られる直線加速器によるものである。近年この治療装置のデジタル化に伴い、コンピュータを駆使してビームや動作の綿密な自動制御が可能になってきた。機械、電子、情報等の工学関連部門のめざましい発展に支えられながら、放射線治療技術の理想の実現が可能になりつつある。定位放射線照射(stereotactic irradiation; STI)や強度変調放射線治療(intensity modulated radiation therapy; IMRT)を含むConformal Radiotherapyがその例である。これらの複雑な照射法による線量分布を治療計画装置(treatment planning system; TPS)で求めるためには、あらかじめTPSに格納する基本データの収集が必要である。また線量分布計算の結果を検証することも重要である。

STIにおいては、4 cm×4 cm以下の極小照射野(extremely small field; ESF)が用いられる。またIMRTでは、小分割された照射野セグメントの合成として多葉コリメータ(multi-leaf collimator; MLC)を使って照射野が形成される。従来の放射線治療ではこのような小照射野を用いることがなかった。ESFにおいては、ファントム中の深さが十分な測定点であっても、二次電子平衡が成立しない場合がある。照射野中心の線量平坦部がほとんどない分布もある。したがって、線量計としての条件の一つに、検出器の小さいことがあげられる。

空間分解能がもっとも優れている線量計として、ハロゲン化銀フィルムが用いられてい

る。しかし、散乱線成分の多い大照射野および小照射野に比べて一次線が多い ESF の線量測定では、光子スペクトルが照射野の大きさに依存することによって、エネルギー依存性の欠点が大きく影響する。また現像処理に由来する線量評価の変動要因が、ハロゲン化銀フィルムの線量計としての信頼性に不安を与えている。高感度用として市販されるようになった放射線顕色フィルムは、ダイナミックレンジの狭さ、治療用としてはまだ低い感度、ロット番号による特性の相違等が問題である。

小形検出器としては熱励起蛍光を利用した熱ルミネセンス線量計 (thermoluminescence dosimeter; TLD) がしばしば用いられる。蛍光量の素子間における変動、アニーリングの方法、照射履歴、フェーディング、保管温度、素子の汚れ等による影響があり、精度のよい測定を期待するにはかなり煩雑な操作が必要である。

半導体線量計は、エネルギー、線量率、温度および方向依存性が欠点として挙げられている。また、二次電子非平衡領域における二次電子飛程の変化が、線量評価に影響を与える。ダイヤモンド線量計は、組織等価検出器として一時注目されたが、線量率依存性や方向依存性が無視できない。

一方治療施設におけるリファレンス線量計は、内径 6 mm 長さ 20 mm 空洞体積 0.6 cm^3 の円筒形電離箱である。医療用線量標準センターを介して準標準線量計および国家標準線量計を経て国際標準に連繫している。したがって超小形電離箱の開発が望ましいと思われた。

また、光ルミネセンス線量計 (photoluminescence dosimeter; PLD) を、高エネルギー X 線の測定に応用することによって、TLD の短所を克服できるかどうかを検討した。近年改良されて、保健物理の分野で再び使われるようになった PLD 計測システムの治療領域への応用が期待できると考えた。

ESF における電離箱による測定方法は、電離箱体積を小さくする以外に、O' Conner の密度尺度理論を適用した Haider と El-Khatib の方法が考えられている。これは低原子番号のファントム中での測定値を、組織等価ファントムの測定値に密度補正によって換算するもので、この方法の適否についても実験を行い、解析した。

2. 研究方法

日本医学物理学会がリファレンス線量計として推奨している JARP 形電離箱に対応する超小形電離箱を、応用技研 (株) およびフジテック (株) と共に開発した。

水または組織等価積層ファントムに 4、6、18 MV のライナック X 線を照射し、深部量曲線、照射野依存性、線量プロフィール、照射野境界の半影、ステム・ケーブル漏洩効果について、開発した超小形電離箱と PLD およびリファレンス線量計である JARP 形電離箱を用いた測定結果を比較、解析した。使用した市販の PLD は素子の大きさが $\phi 1.5 \text{ mm} \times 8.5 \text{ mm}$ の銀活性リン酸塩ガラスである。

① $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ から $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ の照射野について、深部量百分率曲線 (percentage depth dose; PDD) を超小形電離箱 (0.006 cm^3) で測定し、ESF の測定限界を調べた。

②2 cm×2 cm、5 cm×5 cm および 10 cm×10 cm の照射野について、PDD をリファレンス線量計 (0.6 cm³) と超小形電離箱 (0.006 cm³) で測定し、ESF の測定限界を比較した。

③照射野の大きさによる出力係数を超小形電離箱 (0.006 cm³)、リファレンス線量計 (0.6 cm³) および PLD で測定し、ESF への適性をみた。

④ESF のプロフィールを、超小形電離箱 (0.006 cm³) およびリファレンス線量計 (0.6 cm³) で測定し、ハロゲン化銀フィルムのデータとも比較した。

⑤照射野の半分をコリメータで遮蔽して中心軸上の照射野境界の半影を、リファレンス線量計 (0.6 cm³) および超小形電離箱 (0.006 cm³ および 0.0094 cm³) で測定した。

⑥電離箱以外の部分が照射野に含まれているか否かによる電離量の違いを、リファレンス線量計 (0.6 cm³)、超小形電離箱 (0.006 cm³ および 0.0094 cm³) について測定した。

⑦密度尺度理論の適用検証には、組織等価および肺等価ファントムによる深部電離量曲線を求め、密度補正を施した深部電離量曲線と比較して解析した。

3. 実験結果

3. 1 超小形電離箱線量計の開発

①外径 1.6 mm、内径 1.2 mm のアルミニウム壁、0.3 mm 銅の中心電極を-3 V のリチウム電池ごとビニール管で包装した水密構造とし、電池消耗をもって使い切りの電離箱を作製したが、安定値が得にくい上に電源減衰による変動が現れたので、②ガードリング付きの Farmer 形を小型化した通気性構造にし、外径 3 mm、内径 2 mm (空洞体積 0.006 cm³) のアクリル壁、0.5 mm グラファイト中心電極に-10 V を印加した。③これとは別に包埋剤による水密構造とした外径 3.2 mm、内径 2.2 mm (0.0094 cm³) のアクリル壁で 0.5 mm グラファイト中心電極に-220 V の高圧を印加した電離箱を作製し (FDC-C9.4 μ 型)、水中での安定測定を可能にした。④このことから 0.006 cm³ 電離箱の印加電圧を-150 V に上げ、外径 3.2 mm、内径 2.2 mm のアクリル壁、0.3 mm グラファイト中心電極に改めて水密処理を施し、さらに空洞形体を Farmer の原型に近い構造にした (MC-110A 型)。

3. 2 ESF の測定結果

①超小形電離箱 (0.006 cm³) の ESF の限界は、PDD の測定によって 1 cm×1 cm であることがわかった。リファレンス線量計は 2 cm×2 cm 照射野の測定にも適さない。

②10 cm×10 cm 照射野の線量を 1.0 とした 3 cm×3 cm の相対出力は、超小形電離箱 (0.006 cm³) が 0.90、リファレンス線量計 (0.6 cm³) 0.81、PLD は 0.93 であった。

③ESF のプロフィールは、超小形電離箱 (0.006 cm³) がリファレンス線量計 (0.6 cm³) よりも優れ、ハロゲン化銀フィルムとほぼ同じ結果であった。

④中心軸上の照射野境界の半影は、0.006 cm³ と 0.0094 cm³ の超小形電離箱間には相違がなかった。

⑤電離箱以外の部分が照射野に含まれているか否かによる電離量比は、リファレンス線量計 (0.6 cm³) について、照射野 3 cm×3 cm 以上の平均が 1.15、超小形電離箱

について、照射野 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 以上の平均が 0.0094 cm^3 電離箱で 1.38、 0.006 cm^3 電離箱で 1.74 であった。

⑥ 組織等価および肺等価ファントムによる深部電離量曲線を求め、密度補正を施した深部電離量曲線を比較した結果、深さおよび照射野によって、組織最大線量比 (tissue-maximum ratio; TMR) の両ファントムを用いた測定値の比が変化する。すなわち照射野 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ の TMR 比を 1.0 としたときの $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ の TMR 比は、深さ 5 cm で 1.04、10 cm で 1.11、15 cm では 1.16 であった。

4. 考 察

超小形電離箱の開発によって、ESF に適用できる電離箱線量計ができた (MC-110A 型 0.006 cm^3 および FDC-C9.4 μ 型 0.0094 cm^3)。超小形電離箱は深部量曲線、線量プロフィール、照射野依存性、照射野境界の半影ともにリファレンス線量計 (C-110 型 0.6 cm^3) よりも優れており、ESF の測定に適している。電離容積が小さいために電荷量の少ない超小形電離箱は、ステム・ケーブルの影響がリファレンス線量計よりも大きい。しかし $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ から $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ に至る照射野について、電離箱内とステム・ケーブルに生ずる電離量との比が一定であることから、相対的にこれらの影響は無視できる。

ハロゲン化銀フィルム (XV 2, Kodak) と TLD、半導体、ダイヤモンド線量計を用いた測定で、ほぼ同じ結果が得られていることが、ESF に関する多くの報告から判明した。そして MC-110A 型超小形電離箱に匹敵する PTW Freiburg PinPoint chamber (0.015 および 0.005 cm^3) は、ダイヤモンド線量計よりも空間分解能がわずかに劣り、しかも線量率の低い領域におけるケーブル効果も問題にされている。したがって、MC-110A 型がフィルムと同等の空間分解能で、その上ステム・ケーブル効果も少ないことから、PinPoint chamber よりも優れた超小形電離箱である。

PLD はフェーディングや素子間のばらつきが少なく、取り扱いも容易であり、水中でも問題なく安定した精度よい測定ができる。また線量特性がよく、治療領域の高エネルギーの ESF にも適している。PLD は電離箱線量計との相対線量計として用いることができ、ケーブルが必要ない長所を生かして、体腔内のモニター線量計として威力を発揮する。また一度の照射で、多点測定ができる。ダイナミックレンジの広い積算線量計であることを利用して、今後球形の素子を開発すれば、non-coplanar の全方向からの Conformal Radiotherapy への活用が期待できる。

超小形電離箱は TPS に格納する正確なデータが得られるだけでなく、人体ファントムを用いて照射法の検証や治療中の透過線量の測定を正確に行えることによって、複雑な治療法の安全に寄与できる。

密度尺度理論を適用した測定は、混入電子の影響や二次電子飛程の変化によって密度補正だけでは実測値と一致しないことが証明された。