〔第50回総会シンポジウム〕

座 長 集 約

熊 谷 孝 三

国立療養所南福岡病院

Key words: Dosimeter for radiotherapy, Dosimetric theory, Dosimetry of high energy photon and electron-beams, Phantom for radiotherapy

SUMMARY BY CHAIRMAN

KOZO KUMAGAI

Department of Radiology, National Minami Fukuoka Chest Hospital

1. は じ め に

放射線治療成績の向上には、患者に吸収線量を正確に投与することが重要であり、絶対線量の評価を正確に行わなければならない。また、標的容積に対する吸収線量の決定精度は $\pm 5\%$ になるように要求されている (Fig. 1)¹⁾。これには、ファントム照射の累積不確定度が2.5%，患者への投与線量の不確定度が4.2%含まれる。前者のファントムに対する投与線量の不確定度は5段階の手順がとられる。この2.5%の不確定度は、線量測定の手順を正確に実行した最適モデルの場所であり、いい加減な手順による最低モデルの場合では、これだけで約5%の不確定度をもたらすことになる²⁾。

臨床における線量測定の最終目的は、患者体内の明記した点に定めた吸収線量を投与することである。したがって、ファントム照射の段階での投与線量の精度は、線量測定プロトコルの正確な運用とこれに密接に関連する電離箱線量計、放射線測定理論、高エネルギーX線の線量測定法、高エネルギー電子線の線量測定法、そして放射線治療用ファントムについての十分な理解が必要である。

そこで、臨床の場で高精度な線量測定を実施していくために、これらの内容を総合的に線量測定システムとしてとらえ、測定理論の修得から測定手順の臨床応用までを系統的に検討し、問題点についても議論する必要がある。また、このシンポジウムの内容が線量測定法の実務マニュアルとなることを配慮しながら、シンポジストには臨床の場で積極的にご活躍頂いている立場の方をお願いした。

2. ね ら い

このシンポジウムのねらいは、JARPの標準測定法³⁾を基本として考え、次のことに重点を置いた。

(1) 原理的に優れたJARPの標準測定法を確実に運用させ、個々の施設に深く浸透させる。

(2) JARPの測定プロトコルに採用された測定理論の解説と問題点を指摘する。

(3) JARPの測定プロトコルは、やや難解で臨床の現場になじみにくいところがあるので、プロトコルの原則は変更せずに使いやすい手法を導入し、簡略化する。この場合に測定の精度はJARP測定プロトコルと同程度とする。

(4) 実用的な測定法のプロトコルの確立と普及をめざし、治療現場において実務マニュアルとして十分に活用できるようにする。

3. 各国の標準測定法のプロトコル作成の推移

各国において吸収線量の標準測定法のプロトコルが作成され (Table 1)⁴⁾、各施設間の誤差を最小限に抑えようとする努力が実施されている。

吸収線量標準測定法のプロトコルは、HPA (英国病院物理学会)、AAPM (米国医学物理学会)、NACP (北欧臨床物理学会)、DIN (西独規格統一学会)、JARP (日本医学放射線学会物理部会)、ICRU (国際放射線単位測定委員会) によってまとめられている。

最初の測定プロトコルは、1964年にHPAで作成された。これは、光子に関する内容であった。その後、各国で独自の測定プロトコルの作成が開始された。本邦でも、1972年に光子、1974年に電子線に関するプロトコルが作

Fig. 1

Table 1

	HPA	AAPM*	NACP**	DIN***	JARP****	ICRU*****
1960 year	Photon ('64)	Electron ('66)				
1970	Photon ('69)					Photon ICRU 14 ('69)
	Electron ('71)	Photon ('71)	Photon, Electron ('72)	Electron ('72)	Photon ('71)	Electron ICRU 21 ('72)
	Electron ('72)	Photon ('75)		Photon, Electron ('76)	Electron ('72)	
1980			Photon, Electron ('80)	Photon, Electron ('80)		
	Photon, Electron ('83)	Photon, Electron ('83)	Electron ('81)			
	Electron ('85)				Photon, Electron ('86)	Electron ICRU 35 ('85)
1990						

HPA : Hospital Physicists' 3Association.

* AAPM : American Association of Physicists in Medicine.

** NACP : Nordic Association of Clinical Physicists.

*** DIN : Deutsches Institut fur Normung.

**** JARP : Japan Association of Radiological Physics.

***** ICRU : International Commission on Radiation units and measurement.

成された。1980年代になると、各国では絶対線量の評価に必要な空洞理論、電離箱壁の材質、エネルギーの決定方法、および新しい物理定数などの見直しが行われ、プロトコルの改訂に着手した。わが国でも、1983年から改訂作業が進められ、1986年に光子と電子線に関する改訂版が出版された。そして、1989年に修正版が発行され、個々の施設で使用されている。

JARPの測定プロトコルは、原理的に非常に優れたものであるが、運用方法が難解であり、かつ煩雑であり、実際の臨床の場になじみにくいという臨床サイドからの声もある。

5. 放射線治療用電離箱線量計

小口 宏

放射線測定で重要なことは、放射線の何を測定するのか、そして量を測定する場合にはどのような種類の測定器が適しているのかを見いだすことである。ここでは、電離箱線量計、TLD、半導体検出器、フィルム、フリッケ線量計、熱量計など数ある測定器の中から、放射線治療での線量測定で基準となる空洞電離箱線量計について言及した。

電離箱線量計は放射線による気体の電離作用を利用した放射線検出器であり、電離容積中に入射する吸収線量を測定するための読み値を得る機器として定義できる。また、空洞電離箱は一定した容積の空気を壁物質で取り囲んで、この壁物質で生じた二次電子によって空気を電離させる機器である。壁物質の密度（例 A-150： $\rho = 1120 \text{ kg/m}^3$ ）は空気（ $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$ ）の約1000倍であるため、二次電子の飛程は、壁物質では気体の約1/1000になり、空気の電離容積を小さくできる。壁物質を空気と全く原子組成の等しい物質で作り、その中の気体を空気とすれば、空気から逃げる二次電子を壁物質から出る二次電子が補償し、照射線量の測定が可能となる。照射線量を測定する空洞電離箱は、(1)測定する光子エネルギーについて壁物質などの質量エネルギー吸収係数および質量阻止能が知られていること(2)壁の厚さが二次電子平衡厚以上であること(3)壁による一次X線、 γ 線の減弱が補正できること(4)電離電流が正確に測定できること(5)空気の気圧と温度が正確に補正できることなどが必要条件となる⁵⁾。

空洞電離箱は、気体電離に寄与する二次電子の発生源となる電離箱壁、電離箱壁の内側に導電性塗料（アカダック）を塗布したものや導電性物質を利用して電極とする高圧印加電極、電氣的測定系を接続して電離電流や電荷を測定する電荷収集電極、高圧印加電極から電荷収集電極への漏洩電流を側路するなどの保護電極、および多芯シールドケーブルからなる伝送線から構成される。

電離箱線量計で最も重要なことは、フィールド線量計

を臨床の場で使用する前には必ず二次標準線量計による校正を受けなければならないことである。この二次標準線量計は、高い安定性と低いエネルギー依存性を保持し、感度変化は1年間0.5%より大きくあるべきではない⁶⁾。

したがって、放射線測定の一步はトレサビリティを実施することから始まる。

空洞電離箱の種類は円筒型と平行平板型があり、用途に応じて使い分けられる。実際に計測される値は、単なる読み値であるから、電離箱の材質・形状に関する補正や、大気補正、湿度補正、イオン再結合補正、擾乱係数、極性効果などの補正を行い、目的とする値を求める必要がある。また、使用する上で、暗電流、ステム効果、方向依存性、後方散乱などの特性もよく検討する必要がある。印可電圧のチェック、集電極の変形などの確認、慎重な取扱い、保管場所などにも注意を払わなければならない。この電離箱線量計の精度が治療成績に大きく影響するといっても過言ではない。

5. 高エネルギー放射線の測定理論

泉 隆

放射線測定とは、線量計によって放射線と物質の相互作用で生じる吸収線量（率）を決定することである。

線量計測理論は1912年にBraggにより定性的な議論が行われ、1929年、Grayによって空洞理論の基礎が築かれた。これは、次のように表される。

$$D_m = S_{mg} J W_g / e$$

ここで、 D_m は媒質中の吸収線量、 S_{mg} は電子に対する媒質と気体の質量の阻止能比、 J は単位質量当たりに電子が生成する電離イオンの電荷、 W_g は気体中でイオン対を作るのに要する平均エネルギーである。これは、Bragg-Grayの空洞原理と呼ばれ、光子だけでなくすべての放射線に対して、また荷電粒子平衡が成立しないビルドアップ領域および骨と軟部組織の境界領域の吸収線量の測定にも適用される。1955年にはSpencerとAttixが δ 線の役割について注目し、質量阻止能の計算にはあるカットオフの値よりも小さい衝突のみ、いわゆる制限衝突阻止能を用いるべきだと指摘した。1961年にBurlinが実験的にこの理論の方が修正していないBragg-Grayの理論よりもよく合うことを検証した⁷⁾。

最新のJARPの標準測定プロトコルには、この空洞理論の修正のほか、 ^{60}Co γ 線による校正時のビルドアップキャップおよび電離箱の壁の相違、X線および電子線のエネルギー決定方法、新しい物理定理が採用されている。

また、放射能測定では、つねにばらつきをとまうものであるから、誤差の蓄積を考慮して、測定精度を上げていくことが重要である。

放射線治療の線量測定では、前項のとおり第二次標準線量計とフィールド線量計の校正（トレサビリティ）

の必要性が強調されるが、これの幾何学的に配置や具体的な校正方法が示されておらず、早急な治療用線量計の校正体系の確立が望まれる。

6. X線治療における線量測定の臨床応用

水谷武雄

日常の線量測定では、ファントム中の任意の深さにおける吸収線量測定の手順を確実に運用しなければならない。これは、使用する線束のエネルギーを測定することから始まる。なぜなら、深部線量率、TPR、TARなどの線量分布データや吸収線量変換係数はエネルギーの関数であるからである⁸⁾。エネルギーの決定法は、電離七割深($d_{0.7}$)またはTPR比を採用すれば良い。15 MV以上のX線では、線質識別能の高い $d_{0.7}$ の方を優先させている。

X線の媒質中の任意の深さにおける吸収線量 D_m は次式で決定され、これは、電子線にも適用される。

$$D_m = M_m \cdot k_1 \cdot P_{ion} \cdot N_c \cdot C_A$$

ここで、 M_m は線量計の読み値、 k_1 は大気補正係数、 P_{ion} はイオン再結合損失補正、 N_c はコバルト校正定数、 C_A 吸収線量変換係数である。この式は従来の測定プロトコルと本質的には変わらないが、特に C_A の決定方法において修正が加えられている。 C_A は次式で求められる。

$$C_A = A_c \cdot A_w \cdot (W_{air}/e) \cdot 1/(f_m)_A \cdot P_d \cdot P_f$$

ここで、 A_c はコバルト校正時でのビルドアップキャップと電離箱壁の全壁厚に対する吸収散乱の補正、 A_w はコバルト校正時でのビルドアップキャップと壁材質の違いによる電離量の補正、 (W_{air}/e) は気体中でイオン対を作るのに要する平均エネルギー、 f_m は媒質と空気に対する実効制限衝突質量阻止能比、 P_d は変位補正係数、 P_f は電子フルエンス係数である。

これらの種々の因子は、エネルギー、電離箱の材質、内径、有効長、壁厚、容積、ビルドアップキャップの材質と厚さ、中心電極の大きさなどにより異なるため、種々の電離箱線量計について決定しなければならない。したがって、使用する電離箱の吸収線量変換係数を求めれば、吸収線量は簡単に決定することができる。各種の電離箱の吸収線量変換係数をエネルギーごとに表にしておくことと便利である。JARP型電離箱でなければ吸収線量の決定ができないというものでは全くない。

7. 電子線治療における線量測定の臨床応用

吉浦隆雄

線量測定では、電子線のエネルギーは平均エネルギーが採用され、水ファントム表面の平均入射エネルギーを線量半価深(R_{50})から決定する。この方法は理論的に優れているが、決定の手順は非常に煩雑である。エネルギーを決定するために直接得られるのは電離量である。それを吸収線量に変換しなければエネルギー決定はできな

い。しかしながら、吸収線量の変換には、まだ求められていないエネルギーの値が必要である。すなわち、吸収線量への変換には、原則的に逐次近似法によって値を収束させる計算が必要である⁹⁾。精度向上の代償として測定プロトコルの実行手順が煩雑になり、臨床的な運用に支障をきたす可能性を否定できない。したがって、誤差論の見地から測定精度を落とすことなく、電子線に対する吸収線量および平均入射エネルギーの決定方法について簡略化した手順を提案し、運用することは非常に有用である。この方法の特徴は、測定した深部電離量百分率曲線の電離半価深(d_{50})によって平均入射エネルギーを求め、吸収線量変換係数の変換を行うことであり、また、JARPのプロトコルの厳密な計算に準拠して代表的な水ファントムに対する電離箱の吸収線量変換係数を決定し、それを使用しやすいように表にしたことである。この簡略化手順が各施設での日常測定に積極的に運用されることが望まれる。

8. 放射線治療用測定ファントム

熊谷孝三

ファントムは、使用する放射線との相互作用が人体組織と等価な物質である。放射線治療では、人体内の線量測定を行うことは難しく、放射線の吸収と散乱が人体組織と類似した物質が用いられた。組織等価物質となるには、質量減弱係数、質量エネルギー係数、質量阻止能、質量角散乱能、密度が同一でなければならない。また、光子に対しては原子番号と密度を近似させる方法がよく用いられる。しかしながら、すべての放射線の種類とすべての線質について、ただ1種類の組織等価物質で代用できるファントムは今だにない。

放射線測定ファントムは、標準ファントムと人体ファントムに大別される。前者は、通常の測定に用いられる1辺が30 cmの立方体であり、水ファントムと固体ファントムに分類される。後者は、解剖学的構造が人体組織と同一であり、治療方法を確認する線量測定や線量分布測定によく用いられる。

ファントムは、固体と液体が代表的であり、測定には実用的な積層固体ファントムがよく用いられる。また、測定に用いる場合には、測定深の補正、散乱補正、電子フルエンス補正、帯電による測定誤差の誘導などを考慮する必要がある。

均質ファントムには、水、MixDP、ポリスチレン、アクリル、タフウオータ、MT-1などがあるが、種々の面側の補正をする必要のない水ファントムとMixDPファントムが使用ファントムとして最適であろう。また、放射線の相互作用係数や補正係数などが得られていないファントムを測定に用いる場合には、水ファントムとの比較測定によってあらかじめ、種々の補正係数を求め、測定

値は必ず水ファントムに対する吸収線量に換算しなければならない。

7. おわりに

放射線治療における線量測定を手順だけでなく、電離箱線量計、測定理論、X線および電子線の線量測定法、そしてファントムについて検討した。これらについて理解し、正確に運用できれば、各施設間の線量評価が統一され、患者に対する投与線量のばらつきが改善できる。したがって、個々の施設において JARP の測定プロトコルの正確な運用を普及させなければならない。

また、JARP の標準線量測定プロトコルは原理的に非常に優れたものであり、作成されて8年になる。しかしながら、特に電子線測定においては、手順が煩雑なために正確に運用されているとはいえない。どんなにすばらしい測定プロトコルでも、臨床の場で正確に運用されなければ有用だとはいえない。なぜならば、われわれ治療技師が臨床の場で実施する線量測定の精度は、がん患者の放射線治療成績に直接大きな影響を与えるからである。

そこで、運用しやすい線量測定手順を見いだそうとするならば、簡略化手順のように JARP の測定プロトコルの基本原則は変更せず、しかも測定精度も落とさずに実用的な測定プロトコルの確立が望まれる。今後は、これの確立こそが、全般的な放射線治療精度の向上には不可欠であり、本学会の責務であろう。

謝 辞

本シンポジウムの機会を与えて頂いた速水昭雄学会長、金

尾啓右大会長、そして東田善治九州支部長に感謝を申し上げます。

文 献

- 1) ICRU REPORT 24: Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beam of X or Gamma Rays in Radiotherapy, ICRU, WASHINGTON, D.C., U.S.A. (1976).
- 2) Svensson G.K: Int. J. Rad. Oncology Biol. Phys. Suppl 1, 23-29, (1984).
- 3) 日本医学放射線学会物理部会：放射線治療における高エネルギーX線および電子線の吸収線量の標準測定法，通商産業研究社，東京（1986）。
- 4) 川島勝弘：治療線量の標準測定と管理，放治システム研究，83-99，（1986）。
- 5) 野田博治：放射線計測Ⅱ，33-34熊本大学医療技術短期大学部講義資料
- 6) IAEA TECHNICAL REPORTS SERIES No. 18：放射線治療用線量計の校正（訳本），放射線医学研究所，21-22，（1980）。
- 7) 森内和之，高田信久：放射線計測の基礎（訳本），地人書館，83-87，（1988）。
- 8) 川島勝弘：放射線治療のための線量測定，その1，光子エネルギーの決定法，放治研システム，2，17-23，（1985）。
- 9) 熊谷孝三，石松健二，大塚達也，他：電子線の吸収線量測定についての一考察（平均エネルギーの決定法），日本放射線技術学会雑誌，47，15-21，（1991）。