

寝台周囲を弧状に回転する架台を備えた深部放射線治療装置

—さまざまな入射口に対するパラフィン骨盤ファントムの線量分布

*A deep therapy table with a tube stand combined and revolving in arc about the table:
Intensity distribution within paraffin pelvis fo various portal of entry*

Flax N. Radiology 28:477-482,1937

子宮頸癌その他の正中部の腫瘍の放射線治療では、管球を一定に移動しながら小入射口で照射する方法が、確実な有利である。小入射口・移動管球法は、低皮膚線量、著しい高深部線量が得られ、骨盤中心部に正確に照射することができる。高線量の必要性は言うまでもないが、骨盤内の線量分布の精度の重要性についてあらためて述べる。

放射線が骨盤を横切る適切な「角度」が線量分布図の基本であり、放射線の角度が腫瘍部位に最大の十字火効果を与えるようにする。この角度がずれると、骨盤腔内の線量分布が不適切になり、正常組織に障害をおよぼし、腫瘍への効果が損なわれることになる。もちろん術者が、線量分布図に書かれた角度に従って、体内の目に見えない腫瘍にX線管の狙いを定め、これを再現できる能力が必要である。小入射口では、4、6、あるいは7門を必要とし、高度の方向精度が求められ、わずか数度のX線管のずれでも小さな腫瘍を完全にはずしたり、あるいは大きな腫瘍でも、X線の一部だけが腫瘍に当たって、正常組織を障害しないまでも無意味な照射を行なうことがありうる。

一方、前後に大きな照射門を置く2門照射では、高精度の角度設定は不要で、骨盤腔内の線量分布は計画値に良く一致する。しかし、残念ながら深部線量は比較的小さい。ここに記載する小入射口移動管球法は、他のいかなる多門照射法にくらべても深部線量が良好で、通常の2門照射法と同程度の精度をもつものと思われる。移動管球法は、以下に述べる寝台と管球架台を組合わせた方法である。

寝台の両端のベアリングに、寝台の周囲を弧状に回転する空冷管球の架台が取付けられており、円弧の回転中心はこのベアリングに一致して固定されている。寝台は、管球架台とは独立に上下することができ、患者を上下して腫瘍がベアリングの位置に一致するようにする。ベアリングの位置は、円弧の中心にあつて管球はその直径上を移動する。管球自体は架台上で移動して、体の任意の断面に中心を合わせることができる。

寝台の下のモーターは、管球架台を支えるベアリングにギアで連結している。速度はギアボックスで減速され、仰臥位あるいは腹臥位の患者の周囲を一側から

反対側まで、20分で半周する。管球が半周すると、患者の体表の1/2が照射される。患者を裏返して、管球運動を繰り返すことにより体表全体を照射し、体中心を回転中心として、管球運動中すべての方向の放射線がここに集中する。管球が連続的に移動し、常に皮膚表面の新しい部位が入射口となる。ちなみに、管球は耐衝撃性で、その運動は非常に遅いため患者にはほとんどわからない程度である。

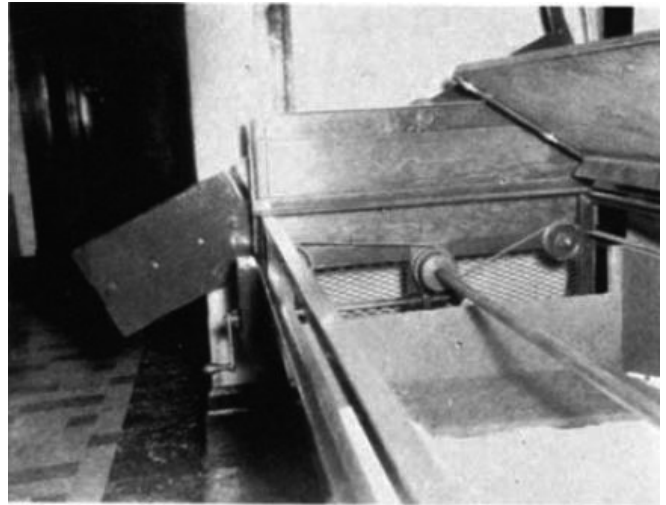
この方法は一見すると、常に放射線がオーバーラップするために皮膚に危険を及ぼすように思えるが、よく考えてみると、常に一定のオーバーラップが均一かつ正確に制御され、容易に計測状態であつて、手動による多門照射の場合のような不正確、偶発的なオーバーラップではない。Arneson & Quinby (Radiology 1935年8月号)による平均的な女性骨盤の大きさ、形状を模した深さ23cm、幅35cmのパラフィンファントムを使用した実験で、表面線量は骨盤中心部の線量より十分に小さいことが分かった。

実験条件は以下の通りである。Villard回路電圧200kVp、0.5mmCu+1mmAlフィルター、電流5mA、焦点—表面距離58.5cm(骨盤上面)~52.5cm(骨盤側面)(骨盤は正円形ではないので、この差は不可避である)。以下の入射口の大きさについて、線量分布を作製した:4×15cm、9×15cm、11×15cm、15×15cm。入射口の最大幅は、骨盤部の体長軸の長さに一致する。いずれの場合も、表面線量は深部線量を超えないことが明らかとなった。最大入射口15×15cmでは、骨盤腔中心部の100%線量に対して表面の最大線量は92%であつた。入射口4×15cmでは、深部線量100%に対して、表面線量はわずか50%であつた。4×15cmで表面線量を100%とすると、深部線量は200%となる。この数値は何回もチェックしたが、体表面を幅4cmに分割すれば、約24個に分割され、すなわち24門の入射口があると考えればこれは驚くに当たらない。4×15cmの小さな照射野は理論的には興味深いが、23×35cmの骨盤の照射には、後述のように非効率である。深部線量100%、表面線量70%の入射口9×15cmの場合は、照射面積を11門に分割したのと等価である。しかし実際の照射では本質的に2門照射であり、1門の管球が一側から対側へ移動し、骨盤を裏返してまた反対側を1門として照射することになる。

* ブース記念病院放射線科 (Department of Roentgenology, Booth Memorial Hospital, Covington, Ky.)



図1. [訳注] 原文にはこの写真の説明がないが、左図は装置全貌で、寝台上にある黒い筒の内部に管球があり、下面の小突出部が照射口、これが寝台の頭部、足部に回転軸を持つゆりかご上の架台に載っており、架台が寝台周囲を半周回転する。上部の2本の線は電源ケーブル。右上図は、寝台を開けたところで、本文中でベアリングと説明されている架台の回転軸と軸受けの部分、右下図はこれを駆動するモーターを示したものと思われる。



表Iは、パラフィン骨盤ファントムを寝台上に置き、高さを中心点を管球の高さに一致するように調節した状態で、真側面から照射した場合である。管球に最大電圧200kVpで通電すると同時に、管球移動モーターを始動する。管球が骨盤を半周して反対側の側面位置まで移動すると、モーターは自動的に停止し、X線もオフになる。この時、Victoreen線量計で、骨盤中心部の深部線量、体表上面には間隔をあけた5カ所の表面線量を計測する。これらの直接計測値に、ファントムを裏返し、電離箱をその下側に置いた状態で計測した値を後方散乱値として加算した。

骨盤側面の距離は52.5cm。上面の距離は58.5cmであることから、側面の線量は上下面よりも大きいと予測されたが、側面の線量は焦点-皮膚間距離が短いにもかかわらず上下面よりも小さかった。この興味深い矛盾の主な原因は、35cm間隔の側面からの後方散乱線が、23cm間隔の上下面からの散乱線よりも少ないためである。

この側面值と上面値の差は、小さな入射口の場合は皮膚線量全体としてはあまり問題にならないが(図2, 図3), その最大値を表Iに示した。深部線量については、上面からの照射と下面からの照射は同じで、両面から

の総深部線量は加算した。

小入射口で深部線量が高くなる理由は、以下の様なものが考えられる。

1. 表面のすべての領域が利用され、表面線量が広い範囲に分布する。機械的装置を使わずに照射する場合は、照射門間に非照射野を設けないと予期せぬオーバーラップが発生して危険である。

2. 皮膚面を9×15cm(本法による最大サイズ)の区画に分割する場合、X線管球は23×35cmの骨盤を回転しながら11区画を通過する。各区画当りの皮膚線量は小さいが、区画数が増えるため線量は増加する。

3. 管球-被写体距離が、通常の50cmではなく、52.5~58.5cmに増大していることが、深部線量を増加させる。この距離の増加による深部線量の増加はわずか数%であり、これは最も小さな原因と思われる。

皮膚の安全性については満足な結果であったことから、次に骨盤内の中心部以外の線量分布について計測した。中心に向けて表面から様々な深さの孔をあけ、この中に順に電離箱を挿入した。孔をあけることによってパラフィンの体積が変化しないように、測定に使う1つの孔以外にはすべてロウソクを充填した。

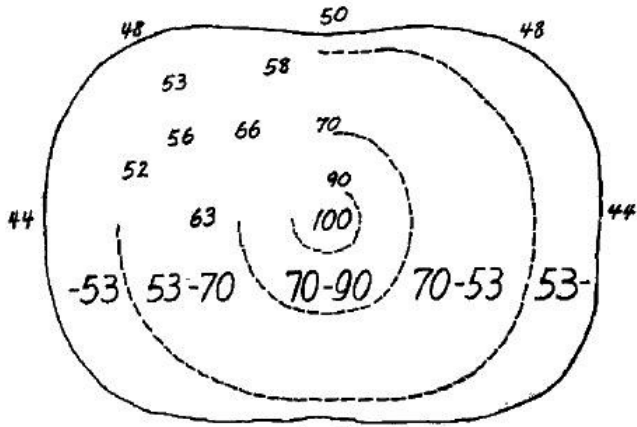


図2. 入射口4×15cm, 骨盤径23×35cmの線量分布.

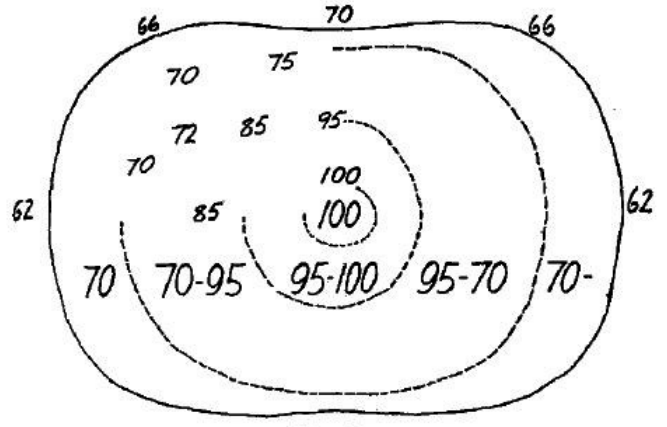


図3. 入射口9×15cm, 骨盤径23×35cmの線量分布.

表Iから、入射口が小さいほど、骨盤中心に100%線量を照射するために必要な表面線量は少ないことがわかる。この結果、4×15cmの入射口が最適と思われる。しかし、4×15cmの場合、中心部以外の骨盤内の計測値は中心を離れると急速に低下し、9×15cm以上の場合は、高値に保たれている。この理由は自明である。すなわち、骨盤の中心領域は、真の中心ではなく、入射口の幅に応じた近接領域の中心だからである。入射口4×15cmの場合、中心領域は幅約4cmで、これが最大線量域となる。9×15cmでは、中心領域は約9cm幅で、大きな範囲では強度が強くなるのがわかる。さらに11×15cmの入射口では、骨盤前後径のほぼ全体を含む領域が最大線量となる。従って、4×15cmの入射口では体幹中心の最大線量域が小さ過ぎ、11×15cm以上の入射口では最大線量域が大き過ぎて皮下組織に大きな線量に加わることになる。

入射口9×15cmの線量分布図(図3)では、線量分布は十分であることがわかる。骨盤の中心部では、中心からの直径約11cm内の100%線量が、辺縁にむかって95%に減少している。その周囲のさらに外側の直径16cmの範囲も85%で、ここから表面にむかって徐々に低下し、上面で70%、側面で62%となる。これで、腫瘍が存在する可能性のある領域に最大線量、正常組織に最小線量を照射できる。これは、非常に好ましい

分布で、通常は表面で100%となり深部に向かって線量が減少する外部照射としては異例といえる。

この値から、平均的な大きさの骨盤で、正中、中心部に照射する場合、入射口は9×15cm以上であってはならないことがわかるが、病変部の集中的な照射が許されるのであればさらに小さな入射口を使用して正常組織をさらに回避することができる。この方法は、入射口が小さいほど有利であることから、腫瘍の局在を正確に知ることができる限り常に最小の入射口を使用するように努めるべきである。気管支腫瘍では、6×15cm、子宮頸癌では9×15cmが適当であろう。移動照射法において、皮膚線量を小さく、深部線量を大きくすると同じく重要な点は、所定の骨盤の大きさに対して、腫瘍領域、すなわち腫瘍の直接局在と浸潤範囲に、可能な限り最大限の線量を分布できる入射口の大きさを選択することである。特殊な場合は、一側の入射口を9×15cm、反対側の入射口を4×15cmあるいは6×15cmとするが、これは通常では不可能なレベルの腫瘍局在同定が必要となり、線量線が細くなりすぎる可能性がある。

表Iから、それぞれの入射口における実際のr単位は、4×15cmを除いて、9×15cm、11×15cm、さらに15×15cmでも大きな差がないことが分かる。入射口9×15cmで骨盤中心に15rが照射される場合、11×

表I. 骨盤ファントム(23×35cm)を管球が1回転したときの表面線量および深部線量(r単位)

入射口(cm)	表面線量 ^{**} (r)	深部線量(r)	表面線量/深部線量(%)
4×15	(4.0+0.5) = 4.5	9.0	50
9×15	(8.5+2.0) = 10.5	15.0	70
11×15	(10.5+3.0) = 13.5	18.5	84
15×15	(1.5+4.5) = 17.0	18.5	92

^{*}表示を読む必要から、モーターの速度は通常の1回転40分ではなく6分とした

^{**}(直接計測線量+反対側からの後方散乱線量)=総線量

表II. 中心部、辺縁部、表面の%線量(骨盤の大きさ23×35cm)

入射口(cm)	中心	中心からの直径 [*] (cm)				皮膚上面	皮膚側面
		5.5	7.5	9.5	13		
4×15	100	70	63	58	53	50	42
9×15	100	95	85	75	70	70	62
11×15	100	104	100	100	84	84	66
9×15	100	102	80	69	67	70	45

^{*}直径は真円ではなく、骨盤の形状に合わせて横方向が長い

15cmでも同じ時間内に16r, 15×15cmでも18.5rが照射されるだけである。この差は、経済的な問題を考えると大きな入射口を選択する理由にはならない。あらゆる点から、平均的な大きさの骨盤では9×15cmで十分であり、これが最大入射口である。

前後径がより大きく、中心までの距離が大きい骨盤では、9×15cmより大きな入射口を使用する場合もあり、大きさと照射範囲によっては11×15cmが使用できる。逆に、23×35cmより小さい骨盤では、9×15cmでも大きすぎる可能性がある。この仮定を、骨盤を20×35cmに縮小し、9×15cm入射口で線量分布を計測することにより実験した(表Ⅱ)。

9×15cm入射口では[訳注：原文では9×12cmとなっているが誤りと思われる]、最大線量域が20×35cmの骨盤腔の中心点に一致しないので(表Ⅱ)、前後径が小さいほど、入射口は小さくするべきであるという結論になる。23×35cmより小さな骨盤では、9×15cm以下の入射口が必要である。これより大きな骨盤では、9×15cm以上の入射口を使用すべきであろうことは推測できる。これで平均的な大きさの骨盤については適切な線量分布を得るための入射口が決定したが、残る問題は、骨盤がこれより小さい、あるいは大きい場合、本法をどのように適用するかということである。おそらく、6×15cmから11×15cmの範囲で、全ての骨盤をカバーできると思われる。これに関してさらなる研究を計画しており、さらに体軸から離れた部分に最大線量を照射する方法についても研究中である。ここでもおそらく、適切な入射口の大きさ、あるいはその組み合わせが問題となるであろう。

平均的な大きさ以外の骨盤の問題はさておいて、本法では、非常に薄い骨盤については適切な入射口を設定すれば有利に照射できるが、標準より大きく、前後径の大きな骨盤で最も良い適応であると言っても過言で

はない。通常の照射法では、薄い骨盤はあまり問題にならないが、大きな骨盤では十分な深部線量を照射することが難しいことから、本法の良い適応である。患者の体型がまるいほど、入射口の皮膚表面積が増大し、腫瘍と表面の距離は延長する。通常法では多くの場合、小さな入射口を深部の目に見えない腫瘍に手動であわせることは困難で、皮膚の表面を適切に利用することはできない。移動管球法では、患者の体積の増加による入射皮膚面積増大の利点を無駄にすることなく、小皮膚線量で深部に大線量を照射できる。

X線束が集中する部位ではオーバーラップがおり、これは骨盤腔の中心で最大となり、線量は最大となる。中心から辺縁に行くにつれてX線束の集中、オーバーラップは減少し、線量も減少し、表面では最も少なくなる。大きな骨盤では、表面と中心の距離が大きいので、皮表、皮下でのオーバーラップは小さな骨盤よりも小さくなる。深部における個々のX線の減弱は、皮膚線量を増大させることで補償できる。

作業量の経済性の面からも、本法は有利である。4門、6門照射のようにその都度管球の角度を変え、その都度管電圧をゆっくりと最高電圧まで増加させるかわりに、本法は単なる前後2門照射である。管球を患者に合わせる必要はなく、単に寝台の高さを管球の回転中心に合わせるだけでよい。

結論

1. 患者周囲を弧状に回転するX線管球を使用することにより、高深部線量、低表面線量が得られる。
2. 線量分布は、骨盤中心部で最大となり、辺縁部にむけて減少し、表面で最低となる。
3. 中心部の硬線領域の範囲は、入射口の大きさと調整できる。