喉頭がん放射線治療における頸部ファントム を用いた吸収線量に関する基礎的研究

群馬大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：亀井民雄教授）

清水 龍一

AN EVALUATION OF ABSORBED DOSES OF HIGH ENERGY ELECTROMAGNETIC RADIATION IN RADIOTHERAPY OF LARYNGEAL CANCER

RYUICHI SHIMIZU, M. D.

Department of Otolaryngology, Gunma University School of Medicine, Maebashi

When ^{60}Co γ rays or high-energy X-rays are externally applied to treat laryngeal cancer, the absorbed dose at the laryngeal lumen is lower than given dose because of air space, which it should pass through, before reaching the lesion. Specially in case of high-energy X-rays, the loss of dose is considerable. Thus, the influence of the laryngeal air space on radiation dose was studied for ^{60}Co γ rays, 6MV X-rays and 10MV X-rays by thermoluminescent dosimetry using neck phantoms having an air cavity in the upper air way.

At the anterior commissure, absorbed dose are apt to be reduced with 6MV and 10MV more than ^{60}Co , but it is not affected by field size or anterior neck angle. In the vocal cord, the doses of 6MV and 10MV decrease in proportion to field size. In the posterior commissure, the reduction in dose varies according field size and anterior neck angle, but it is not related with radiation energy.

From the above results, it is concluded that ^{60}Co is the most suitable for radiotherapy of laryngeal cancer of these three rays, and, when high-energy X-rays above 6MV are applied, the loss of dose more than ^{60}Co in the anterior commissure and the vocal cord should be taken into account.

Key words: 喉頭がん, 放射線治療, 吸収線量, 頸部ファントム,
熱蛍光法

A 93—0796—60387

1. 緒 言

喉頭がんの放射線治療は、ことに早期喉頭がんでは良好な成績を示し、T1 声門がん¹⁾の放射線単独治療成績は5年局所制御率で80—95%に達する^{2)~4)}。しかし、残る5—20%は再発を来し、手術治療の対象となっているのも現状である。この放射線治療による局所制御不成功の理由としては、腫瘍自体に関するもの⁵⁾¹⁰⁾、宿主に関するものと共に¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾、放射線治療技術上の要因があげられている¹³⁾¹⁰⁾¹⁴⁾。そしてこの放射線治療技術要因の一つとして、喉頭がん治療に用いられる放射線の種類および線質の問題がある²⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。すなわち、喉頭

がんの外照射には ^{60}Co 線あるいは4MV X線が適するとされているが¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾、現在各治療施設で保有する放射線治療装置は多種であるが²⁰⁾、一施設が保有できる機種は1—2種に限定されるため、施設によっては6MV以上の高エネルギーX線を用いざるを得ないこともあり、喉頭がん治療の成否にとり無視し得えない要因となる。

さらに放射線治療技術に関する問題の一つに、喉頭がんの腫瘍局在に関連する問題がある。すなわち、喉頭がんの放射線単独治療による局所制御率は、腫瘍の占拠部位によっても異なる²¹⁾²²⁾²³⁾²⁴⁾。たとえば、Wang

A : Anterior neck angle B : Anterior neck-anterior commissure distance
G : Glottis M : M.sternocleidomastoideus T : Thyroid cartilage
V : Vertebra

図1 CTによる前頸部角度と前頸部前連合間距離の測定

(1978)¹⁰によると、T1声門がんでは腫瘍が声帯前3分の2に限局する例では、局所制御率が92%であったのに対し、前連合進展例では81%、声帯後部進展例では76%に低下するとされ、Sinha(1987)¹¹によると、早期声門がんでは声帯前3分の2限局例では、局所制御率が91%であったのに対し、前連合進展例では81%、声帯後部進展例では74%に低下するという。またSungら(1979)¹⁰は、T1声門がんでは声帯前3分の2限局例では、局所制御率が83%であったのに対し、声帯後部進展例では77%に低下していたとしている。

では何故このような問題が喉頭がん治療に生じるか、それは主として喉頭の特異な形態に起因すると考えられる。すなわち、喉頭は内部に空洞を有する複雑な管腔構造を形成しており、外部照射の場合、内部の空気層の影響を受け吸収線量の低下が惹起される¹¹⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁴⁾、喉頭がん放射線治療に不利益な影響を及ぼしているとされている²⁸⁾⁽²⁹⁾。そしてこの影響は、喉頭内の部位により、また放射線の種類および線質によって異なることが考えられる。

この喉頭各部位における吸収線量の差の問題を解決

するためには、ファントムによる吸収線量の実測が必要である。しかし、これまでのファントムを用いた吸収線量の実測の報告¹⁸⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾では、ファントム内に生体に近い喉頭内腔構造が作製されていないため、喉頭の各部位における空気層の吸収線量に及ぼす影響の違いの検討がなされていなかった。そこで著者はこのたび、内部に生体に近い喉頭内腔構造を有する頸部ファントムを作製し、これを用いて⁶⁰Co線、6MV X線ならびに10MV X線における吸収線量を、前連合、声帯、後連合の各部位について、熱蛍光法(Thermoluminescent dosimetry, 以下TLDと略)²⁷⁾により測定し、放射線の種類および線質の違いが、喉頭各部位の吸収線量に及ぼす影響につき検討した。

II. 研究方法

1. 頸部ファントムの作製

a) 喉頭CTによる前頸部角度ならびに前頸部前連合間距離の測定

ファントム作製にあたり、頸部の解剖学的構造の観察にcomputed tomography(以下CTと略)が有用で

あることから²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾，成人男子早期喉頭がん症例のCT像で，声門における水平断面にて，喉頭の解剖学的関係に異常が認められなかった29例のCT像より，図1のごとく，前頸部角度（両側胸鎖乳突筋の前縁と前頸部正中皮膚とのなす角度：A）と，前頸部前連合間距離（前頸部正中皮膚より喉頭前連合までの距離：B）を計測し，ファントムの基本構造を決定した。CTの撮影には，GE8800 CT/T スキャナー（General Electronics 社製）を用い，計測はCT画像のハードコピー像より行った。その結果は，前頸部角度は $108.6 \pm 10.9^\circ$ （平均±標準偏差），前頸部前連合間距離は $11.6 \pm 3.0\text{mm}$ （平均±標準偏差）であった。

b) ファントムの作製

前頸部角度の相異により側頸部皮膚より病巣までの距離が異なり吸収線量に影響を及ぼすので，前頸部角度として平均±2標準偏差の範囲の3種類のファントム，すなわち前頸部角度 90° ファントム（以下 90° ファントム），前頸部角度 110° ファントム（以下 110° ファントム），前頸部角度 130° ファントム（以下 130° ファントム）を作製し，各ファントムともその内部構造を生体に極力近い形態のものにするため，ファントム内部に次の方法で喉頭内腔（空洞）を作製し，前頸部前連合間距離はその平均の 12mm とした。ファントムの材質には，簡便に自由な形態を形成できる Mix-DP³¹⁾³²⁾を使用した。

作製方法：まず，喉頭内腔を作るための鋳型の作製のため，喉頭に病変のない成人（54歳，男子）の病理解剖摘出喉頭を，喉頭背側正中にて後連合を通る線で，縦方向に気管にかけて切断しておき，他方2液型室温硬化型ゴム（シリコーン KE51，信越化学社製） 50ml を，計量カップ内に入れて強く攪拌しながら，架橋剤（CAT-RS，信越化学社製） 2.5ml を急速にその中に注入した。架橋剤注入と同時に，ゴムの体積の増加と硬化が始まるため，約20ないし30秒程度攪拌しながら，ゴムが流動性のあるうちに，素早く切開された摘出喉頭背側より注入し，約2分間経過しゴムが硬化した後に，切開した喉頭背側より喉頭内腔鋳型を取り出した。この取り出された喉頭内腔鋳型を，Mix-DPをファントム鋳型に注入する際に，前頸部前連合間距離が 12mm になるようにファントム鋳型内に固定した。ファントム鋳型（高さ 30cm ）は薄い鉄板を用い，前頸部角度が 90° ， 110° および 130° となるよう3種類を作製した。Mix-DPを加熱して溶解した後に，喉頭内腔鋳型を固定したファントム鋳型内にゆっくり注入し，室温に

図2 前頸部角度 90° ファントムの水平断面
（声門の 2cm 上方）

て24時間放置した後に，ファントム鋳型よりファントムを取り出した。ついで喉頭内腔鋳型をファントム内より除去するために，ファントムの単純X線撮影（正面像）を行って声門の高さを確認後，声門より上方 2cm の高さにてファントムを水平に切断し，喉頭内腔鋳型を中耳手術用鋭匙にてファントムよりかき出して喉頭内腔領域（空洞）を作製した（図2）。実験に際しては，上下に2分されたファントムを元の位置に戻して使用した。

2. TLDによる吸収線量の測定および照射方法

ファントムには，TLD素子を挿入する直径 2mm の小孔群を，ファントムの縦軸方向に平行に旋盤を用いて作製した（図2のファントム割面に垂直な7つの小孔）。穴の深さは，TLD素子の中央が声門の高さとなるようにし，TLD素子の位置は，前連合部位では前連合より前方に 2mm と 6mm の2カ所（図3のNo1, 2），声帯部位では声帯中央の声帯辺縁より外側方に 4mm 間隔で4カ所（図3のNo3-6），後連合部位では後連合の後方 2mm （図3のNo7）の計7カ所とした。

照射方法は，左右対向2門（図3）とし，各側 1.0Gy ずつ，計 2.0Gy の照射を行った。照射野は， $4 \times 4\text{cm}^2$ ， $5 \times 5\text{cm}^2$ の2種類とした。放射線としては，放射性同位元素回転治療装置 RCR-120-31（東芝電気社製）による ^{60}Co 線，ライナック ML15MbX（三菱電気社製）

A : Contour of phantom B : Contour of glottis
 C : Radiation field ($4 \times 4 \text{ cm}^2$, $5 \times 5 \text{ cm}^2$)
 ⇐ : Direction of radiation beam
 No. 1 ~ 7 : Thermoluminescent dosimeter
 Distances between each dosimeter (1 ~ 2, 3 ~ 4, 4 ~ 5, 5 ~ 6) are 4mm.
 2mm are depth from anterior commissure in No. 1 dosimeter and
 posterior commissure in No. 7 dosimeter.
 Depth from edge of vocal cord in No. 3 dosimeter is 4mm.

図3 ファントムにおける熱蛍光素子の位置と照射野

による6MVおよび10MVのX線、の3種類を使用した。線源標的距離は、 ^{60}Co 線では650mm、6MV X線および10MV X線では1,000mmとした。照射深度は、照射野中央において側頸部皮膚より照射回転軸中心までの距離とした。照射には3種類のファントムのそれぞれにつき3種類の放射線を使用し、線量測定はそれぞれの照射条件につき5回ずつ行った。

使用したTLD素子は、 $\text{MgB}_2\text{O}_7 : \text{Tb}$ 素子 (Kasei Optonix社製)で、500 $^\circ$ 、15分間のアニール²⁷⁾を行った後に実験に使用した。吸収線量の絶対値は、 ^{60}Co 線、6MV X線および10MV X線のそれぞれについて作成した校正直線を用いて、TLD素子の熱発光量より算出した。TLD素子の熱発光量の計測には、Kyokko TLD Reader 2500 (Kasei Optonix社製)を使用した。

またTLDにはレスポンスのエネルギー依存性、非直線性およびフェージング、並びにアニール処理による線量測定特性の変化、また、光または機械的刺激に対する感受性が素子の材質、形状により異なり、使用に注意を要する²⁷⁾。今回の実験では、TLDの反復回数も少なく、測定した吸収線量も直線性を示す範囲内であったが、各エネルギーごとの校正直線より、5%前後の不確か度が見込まれた。

なお実験結果の有意差検定はT検定によった。

III. 結 果

1. 前連合より前方へ深さ2mm、6mm(図3のNo. 1, 2)における吸収線量

この部(以下、前連合部位)の測定結果(平均±標準誤差、以下同様)を、図4に示す、まず ^{60}Co 線の吸収線量について注目すると、最大 $2.195 \pm 0.032 \text{ Gy}$ (110 $^\circ$ ファントム、深さ2mm、照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$)、最小 $1.882 \pm 0.081 \text{ Gy}$ (130 $^\circ$ ファントム、深さ2mm、照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$)の範囲にあり、ファントムの種類、TLD素子の深さならびに照射野の大きさにほぼ無関係に2.0Gy前後と一定である。これに対し6MV X線、10MV X線では、ともに明らかに吸収線量の低下が認められ、その多くで ^{60}Co 線との比較で低下は有意である。

すなわち、90 $^\circ$ ファントムでは照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ の場合は、深さ2mmでは6MV X線で11% ($p < 0.05$)、10MV X線で21% ($P < 0.01$)、深さ6mmでは6MV X線で9% ($P > 0.05$)、10MV X線で24% ($p < 0.01$)、照射野 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ の場合は、深さ2mmでは6MV X線で11% ($p < 0.05$)、10MV X線で15% ($P < 0.01$)、深さ6mmでは10MV X線で24% ($P < 0.01$)の低下が認められた。

110 $^\circ$ ファントムでは、照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ の場合は、深

図4 前連合部位の吸収線量

図5 声帯部位の前頸部角度90°ファントムにおける吸収線量

き 2mm では 6MV X 線で 18% ($P < 0.01$), 10MV X 線で 19% ($P < 0.01$), 深さ 6mm では 6MV X 線で 10% ($P < 0.01$), 10MV X 線で 14% ($P < 0.01$), 照射野 $5 \times 5\text{cm}^2$ の場合は, 深さ 2mm では 6MV X 線で 11% ($P <$

0.01), 10MV X 線で 11% ($P < 0.05$), 深さ 6mm では 6MV X 線で 16% ($P < 0.01$), 10MV X 線では 22% ($P < 0.01$) の低下が認められた。

130°ファントムでは, 深さ 2mm ではいずれの照射

図6 声帯部位の前頸部角度110°ファントムにおける吸収線量

図7 声帯部位の前頸部角度130°ファントムにおける吸収線量

野でも、 ^{60}Co 線と6MV X線または10MV X線との間に有意差は認められなかった。深さ6mmでは照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ の場合は、6MV X線では15% ($P > 0.05$)、10MV X線では18% ($P < 0.01$)、照射野 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ の場合は、6MV X線では9% ($P > 0.05$)、10MV X線では11% ($P < 0.05$)の低下が認められた。

すなわち、 ^{60}Co 線に対する吸収線量の低下は、6MV X線より10MV X線で一層著明で、およそ前者で12% (最大20%以内)、後者で18% (最大25%以内)に達する。なお照射野の大きさの違いによる比較では、すべてのファントムおよび放射線につき有意差を認めず。また前頸部角度の大きさの違いによる比較でも、

110°ファントムとの比較でほとんどすべての場合、吸収線量に有意差は認められなかった。

2. 声帯中央辺縁より側頭部方向への深さ4mm, 8mm, 12mm, 16mm(図3のNo3-6)における吸収線量

この部(以下、声帯中央部)の測定結果について、まず ^{60}Co 線の吸収線量に注目すると、90°ファントムでは図5のごとく、最大 $2.160 \pm 0.065\text{Gy}$ (深さ12mm, 照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$)、最小 $1.900 \pm 0.074\text{Gy}$ (深さ8mm, 照射野 $5 \times 5\text{cm}^2$)、110°ファントムでは図6のごとく最大 $2.149 \pm 0.051\text{Gy}$ (深さ16mm, 照射野 $5 \times 5\text{cm}^2$)、最小 $1.943 \pm 0.079\text{Gy}$ (深さ12mm, 照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$)、130°ファントムでは図7のごとく最大 $2.115 \pm 0.085\text{Gy}$ (深さ8mm, 照射野 $5 \times 5\text{cm}^2$)、最小 $1.904 \pm 0.056\text{Gy}$ (深さ12mm, 照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$)の範囲にあり、前連合部位の場合と同様にいずれのファントムにおいても、TLD素子の深さならびに照射野の大きさに無関係に、ほぼ2.0Gy前後と一定で特別な増減を示さない。これに対して6MV X線、10MV X線では、その多くで吸収線量が ^{60}Co 線と比較し有意に低下している。

すなわち90°ファントムでは照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$ の場合には、6MV X線では深さ4mmで16%($P < 0.01$)、8mmで12%($P < 0.01$)、12mmで15%($P < 0.01$)、16mmで25%($P < 0.01$)、また10MV X線では、深さ4mmで22%($P < 0.01$)、8mmで14%($P < 0.01$)、12mmで28%($P < 0.01$)、16mmで33%($P < 0.01$)の低下が認められ、また照射野 $5 \times 5\text{cm}^2$ の場合には、深さ4mm, 8mmでは、 ^{60}Co 線と6MV X線または10MV X線との間に有意差は認められなかったが、6MV X線では、深さ12mmで9%($P < 0.05$)、16mmで11%($P < 0.05$)、10MV X線では深さ12mmで15%($P < 0.01$)、16mmで26%($P < 0.01$)の低下が認められた(図5)。

110°ファントムでは、照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$ の場合には、6MV X線では深さ4mmで8%($P < 0.01$)、8mmで10%($P > 0.05$)、12mmで10%($P > 0.05$)、16mmで15%($P < 0.01$)、10MV X線では、深さ4mmで18%($P < 0.01$)、8mmで22%($P < 0.01$)、12mmで19%($P < 0.01$)、16mmで22%($P < 0.01$)の低下が認められ、また照射野 $5 \times 5\text{cm}^2$ の場合には、6MV X線では深さ4mmで差はなく、深さ8mmで9%($P > 0.05$)、12mmで9%($P > 0.05$)、16mmで11%($P > 0.05$)の低下が認められ、また10MV X線では、深さ4mmで14%($P < 0.05$)、8mmで12%($P > 0.05$)、12mmで14%

($P > 0.05$)、16mmで24%($P < 0.01$)の低下が認められた(図6)。

130°ファントムでは、照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$ の場合には、6MV X線では深さ4mmで9%($P > 0.05$)、8mmで12%($P < 0.01$)、16mmで12%($P < 0.01$)、10MV X線では、深さ4mmで10%($P < 0.05$)、8mmで13%($P < 0.01$)、12mmで12%($P < 0.01$)、16mmで20%($P < 0.01$)の低下が認められ、また照射野 $5 \times 5\text{cm}^2$ の場合には、深さ12mmでは10MV X線で13%($P < 0.05$)、16mmでは6MV X線で9%($P < 0.05$)、10MV X線で9%($P < 0.05$)の低下が認められたが、深さ4mm, 8mmでは6MV X線、10MV X線、ともに、 ^{60}Co 線との間に有意差は認められなかった(図7)。

すなわち、 ^{60}Co 線に対する吸収線量の低下は、前連合部位の場合と同様に6MV X線より10MV X線で一層著明で、全体としては前連合部位の場合と同様に、およそ前者で12%(最大25%以内)、後者で18%(最大35%以内)に達する。ただしこの差は照射野が小さい場合、前頭部角度が小さい場合、また深さ(声帯縁からの距離)が大きい程著明になる傾向があり、たとえば90°ファントムにおける照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$ の場合、深さ16mmの部位での10MV X線の吸収線量の低下は33%に達する。これに対し、逆に130°ファントムにおける照射野 $5 \times 5\text{cm}^2$ の場合では、10MV X線の場合でも吸収線量の低下は僅少である。

なお各放射線についての照射野の大きさの違いによる吸収線量の比較では、90°ファントムにおいては照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$ の場合、 $5 \times 5\text{cm}^2$ との比較で、深さ4mmで6MV X線で16%($P < 0.01$)、10MV X線では19%($P < 0.01$)、深さ12mmでは10MV X線で12%($P < 0.05$)の低下が認められた。しかしそれ以外では110°ファントムおよび130°ファントムの場合も含め明らかな差は認めなかった。また各放射線についての前頭部角度の大きさの違いによる吸収線量の比較では、110°ファントムに対する比較で、すべての場合につき有意差は認められなかった。

3. 後連合より後方へ深さ2mm(図3のNo7)における吸収線量

この部(以下、後連合部位)の測定結果を図8に示す。すなわちこの部位は各放射線とも、照射野と前頭部角度の影響を強く受け、照射野が小さい程、また前頭部角度が大きい程吸収量が低下する。

すなわち、まず ^{60}Co 線についてみると、吸収線量は照射野 $4 \times 4\text{cm}^2$ の場合、ファントムで $1.732 \pm$

図8 後連合部位の吸収線量

図9 後連合部位の照射野の大きさによる吸収線量の比較

0.038Gy, 110°ファントムで $1.299 \pm 0.020\text{Gy}$, 130°ファントムで $1.113 \pm 0.051\text{Gy}$ と、それぞれ2.0Gyの照射線量に対し13%, 35%, および44%の低下を示し、また照射野 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ の場合は90°ファントムで $2.047 \pm 0.099\text{Gy}$, 110°ファントムで $1.739 \pm 0.039\text{Gy}$, 130°ファントムで $1.566 \pm 0.046\text{Gy}$ と、90°ファントム

では吸収線量は低下しないが、110°ファントムでは13%, 130°ファントムでは22%の減少を示す。そしてこれら照射野の大きさの相異による吸収線量の相違は有意であり(図9), 照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ において $5 \times 5 \text{ cm}^2$ の場合より吸収線量の低下が著しく、その割合は90°ファントムで16%, 110°ファントムで29%, 130°ファン

トムで29%である。また、前頸部角度が 110° 以上と大きくなると、いずれの照射野の場合でも、90°ファントムの場合に比較し吸収線量は有意($P<0.01$)に低下する(図8)。

つぎに6MV X線および10MV X線についてみても、吸収線量の低下は ^{60}Co 線の場合と全く同様の態度を示し、しかも各放射線間にほとんど有意差は認めない(図8、図9)。

要するにこの部位は、放射線の種類とほぼ無関係に、成人男子の平均的な前頸部角度(110°)の場合、照射野 $4\times 4\text{cm}^2$ では最大45%、 $5\times 5\text{cm}^2$ の場合は最大25%の吸収線量の低下が見込まれる。

IV. 考 案

T1 声門がんには放射線治療による不成功例が5-20%あり²¹⁻²³、その理由の一端が線種、線量および腫瘍の局在の問題にある訳であるが、これらの直接的な解決法は喉頭組織内の吸収線量を知ることである。しかし、患者や生体では組織内線量の測定は困難であり、また喉頭のような複雑な空洞を持つ器官の場合、理論的に線量分布を知ることにも困難である。今回の実験はこれらの諸問題の解決のため、ファントムを用いたものである。従来の研究でも頸部ファントムを用いた喉頭の吸収線量の測定は行われているが⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾、喉頭室のような複雑な空洞を有するファントムは作製されておらず、したがって喉頭各部の吸収線量に空気層が及ぼす影響は検討されていない。この点、今回用いたファントムでは、その内部にきわめて生体に近い喉頭内腔が作製されており、吸収線量を喉頭の各部位ごとに測定することが可能になっている。そしてとりわけ、喉頭内腔鑄型を作製するため工夫されたこのたびの室温硬化型ゴムを用いる方法は、摘出臓器を傷付けることがないため、他の管腔臓器のファントム内の内腔構造作製に 응용できる有用な方法と思われる。さて今回のファントム実験の成績は、およそ次のように要約される。すなわち、

1) ^{60}Co 線は喉頭後連合部位を除いては、少なくとも前連合部位および声帯中央部位においては、ほとんど吸収線量の低下を来さない。

2) 6MV X線や10MV X線などの高エネルギーX線照射では、前連合部位や声帯中央部位で ^{60}Co 線に比較して吸収線量の低下を来し、その程度は6MV X線でおおよそ12%(10-20%)、10MV X線でおおよそ18%(15-30%)に達する。

3) 声帯中央部位では小照射野($4\times 4\text{cm}^2$)の場合、前頸部角度が小さい場合また声帯縁からの深さが大きい場合、吸収線量の低下は大きく、その程度は ^{60}Co 線に比較して35%の低下に達しうる。

4) 後連合部位では放射線の種類にほぼ無関係に吸収線量の低下を生じ、その程度は照射野が小さい場合($4\times 4\text{cm}^2$)、また前頸部角度が大きいほど著しく、その割合は前頸部角度が平均(110°)以上の場合、照射野 $4\times 4\text{cm}^2$ で照射線量の約45%、 $5\times 5\text{cm}^2$ の場合で約25%に達しうる。

では、これらの諸点は従来の報告にみられる臨床的事実とどのように符合あるいは矛盾するであろうか。

まず喉頭がんを用いられる放射線の種類については、治療成績上 ^{60}Co 線、あるいは4MV X線が良い⁽²¹⁾⁽²²⁾⁽²³⁾とされている。放射線の種類の違いによるT1 声門がんの局所制御率の比較では、Sung ら(1979)⁽¹⁶⁾によれば5年局所制御率は、 ^{60}Co 線で87%であったのに対し、6MV X線では60%に低下し、さらに Mittal ら(1983)⁽²⁴⁾によれば、再発率の比較で、 ^{60}Co 線の13%に対し4MV X線でも15%で差がなかったとしている。このたびの成績からも、6MV 以上のエネルギーのX線を使用した場合は、前連合部位から声帯中央部位にかけて、 ^{60}Co 線と比較して吸収線量が低下し、喉頭がんの放射線治療成績に悪影響を及ぼすことが考えられる。すなわち、喉頭のこれらの部位の放射線治療において、 ^{60}Co 線を用いることが望ましく、またX線を使用する時は、6MV 以下のことに4MV X線を使用することがすすめられる。

声門後部に進展した喉頭がんでは放射線の治療成績が悪いことは、臨床医の一致した経験である。T1 声門がんの放射線治療による局所制御率についての Wang (1978)⁽²⁾、Sung ら(1979)⁽¹⁶⁾、Sinha (1987)⁽²¹⁾らの報告を要約してみると、声帯限局例(ことに前方3分の2)で90%、前連合進展例で80%、声帯後部進展例で75%である。今回のファントムの実験の成績からみると、声帯後部進展例で局所制御率がこのように大きく低下する理由の一つとして、この部における吸収線量の低下によることが考えられる。そしてこの低下は放射線の種類や線質に依存しない。したがって腫瘍のこの部への進展例では、放射線の種類や線質に関係なく、ことに前頸部角度が大きい場合には、照射野を大きく($5\times 5\text{cm}^2$ 以上)とる必要があると思われる。後連合部位で各放射線の間に吸収線量の差があまりないことは、前連合や声帯中央部位と異なる特徴である。この

理由としては、実際 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線においては 6MV X線や 10MV X線と比較し声門、すなわち空洞の影響は少ない¹⁸⁾が、一方、側頸部皮膚から後連合部位までの深さが大きい。ため、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線では 6MV X線や 10MV X線などの高エネルギー X線と比較して基準線量分布²⁴⁾からの吸収線量の低下が大きくなり、空洞と深さの影響がともに相殺し合い、見かけ上放射線の種類による吸収線量の差が現れにくいためと考えられる。

声帯限局がんと、前連合進展例の放射線局所制御率の比較では、上述のごとく前連合進展例において約 10% 制御率が悪い。しかるに今回のファントム実験では、同一の放射線を用いる限り、そして腫瘍が声帯から側方にあまり深く浸潤していないという条件下では、声帯中央部位も前連合部位も吸収線量に著差はない。この点、臨床的に前連合部がんにおいて放射線による局所制御率が低い理由の一つとして、この部に進展する腫瘍においては一般に進展度が高いことが考えられる。以上、喉頭がんの放射線治療には腫瘍の局在のいかにかわらず、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線あるいは 4MV X線を選択すべきことが考えられる。

照射野に関しては、その大きさを広げることにより、局所制御率を向上させることができる⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾とされている。今回の結果からも、声帯中央部位では照射野を $4 \times 4 \text{cm}^2$ から $5 \times 5 \text{cm}^2$ にまで広げることにより、前頸部角度の小さい場合、6MV X線および 10MV X線照射において 10—20% 程吸収線量の低下が軽減されることが期待される。また後連合部位では、照射野 $4 \times 4 \text{cm}^2$ は $5 \times 5 \text{cm}^2$ に対し、15ないし 30% の吸収線量の低下が認められているが、Epp ら (1977)¹⁵⁾ は、照射野を少なくとも空洞より 1cm 大きくとる必要があるとしており、とくに後連合や声帯後部に腫瘍が進展している場合は、照射野の大きさを十分大きくとることが必要となる。これらの点、T1 声門がんにおいても照射野の大きさは少なくとも $5 \times 5 \text{cm}^2$ 以上を基本とする必要があると思われる。

前頸部角度については、一般にそれが大きい場合は、吸収線量の低下がより大きく、局所制御率の低下を招く恐れがあることが考えられる。この点頸部 CT 等を用いた詳細な頸部構造の把握²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾も、喉頭がんの局所制御に重要である。

V. 要 約

人の喉頭内腔構造を有する頸部ファントムを作製し、声門周囲における各所の放射線吸収線量を、数種

の放射線について測定した。

1. 吸収線量は喉頭の各部位 (位置、組織内深度)、放射線の種類によって大きく異なり、照射野の大きさ、前頸部角度によっても影響された。

2. $^{60}\text{Co}\gamma$ 線は後連合部位を除き、部位や照射条件による吸収線量の明らかな低下は来さなかった。

3. 6MV X線や 10MV X線などの高エネルギー X線は、声帯中央部位や前連合部位で吸収線量の低下を来し、その程度は 6MV X線で $^{60}\text{Co}\gamma$ 線のおよそ 12% (5—20%)、10MV X線ではおよそ 18% (15—30%) に達した。またことに声帯中央部位では、照射野が小さい場合、前頸部角度が小さい場合、また組織内深度が大きい場合、吸収線量の低下が著明になる傾向がみられた。

4. 後連合部位では放射線の種類に関係なく同程度の吸収線量の低下を来し、その程度は前頸部角度および照射野によって異なるが、最大 25% (照射野 $5 \times 5 \text{cm}^2$ の場合) — 45% (照射野 $4 \times 4 \text{cm}^2$ の場合) にも及ぶうる。

以上より喉頭がん (T1 声門がん) の外照射による放射線治療には $^{60}\text{Co}\gamma$ 線 (または 4MV X線) を使用し、照射野の大きさとしては $5 \times 5 \text{cm}^2$ 以上とすることが望ましいと思われる。

文 献

- 1) Larynx; TNM-Atlas illustrated guide to the classification of malignant tumor. UICC, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1982, pp 29-36.
- 2) Wang CC: Treatment of squamous cell carcinoma of the larynx. Radiologic Clinics of North America 16: 209-218, 1978.
- 3) 梅垣洋一郎: 喉頭癌の放射線治療. 癌の臨床 17: 90-96, 1971.
- 4) Inoue T, Shigematsu Y, Sato T: Results of radiation therapy of early carcinoma of the vocal cords. Acta Radiologica Therapy Physics Biology 14: 318-324, 1975.
- 5) 佐藤武男: 喉頭癌; 耳鼻咽喉科 (頭頸部外科) サイドより. 癌の臨床 31: 1581-1589, 1985.
- 6) 境野宏治: 喉頭癌. 臨床放射線医学全書 14/A 放射線治療学 [各論 1], 金原出版, 東京, 1986, 164-188 頁.
- 7) Sinha PP: Radiation therapy in early carcinoma of the true vocal cords (stage I and stage II). Int J Radiat Oncol Biol Phys 13: 1635-1640, 1987.

- 8) 早川和重, 三橋紀夫, 池田 一, 玉木義雄, 山川通隆 他: 喉頭癌の放射線治療上の問題点—とくに声門癌について—. *J Jpn Soc Cancer Ther* 19: 2069-2074, 1984.
- 9) 土師屋卓志: 喉頭癌治療: 放射線科サイドより. 癌の臨床 31: 1571-1580, 1985.
- 10) 佐藤武男: 放射線抵抗性喉頭癌. 喉頭癌—その基礎と臨床—. 金原出版, 東京, 1986, 183-196頁.
- 11) 新部英男: 放射線の生物効果と形態変化, 放射線腫瘍学. 講談社, 東京, 1988, 16-37頁.
- 12) Fletcher GH: Cause of failure to control tumors by irradiation. *Textbook of radiotherapy*, third edition. Lea and Feiberger, Philadelphia, 1980, pp146-148.
- 13) Fletcher GH, Lindberg RD, Hamberger A et al: Reasons for irradiation failure in squamous cell carcinoma of the larynx. *Laryngoscope* 85: 987-1003, 1975.
- 14) Peters LJ, Withers HR, Thames HD et al: Tumor radioresistance in clinical radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 8: 101-108, 1982.
- 15) Epp ER, Boyer AL, Doppke KP: Underdosing of lesions resulting from lack of electronic equilibrium in upper respiratory air cavities irradiated by 10 MV X-ray beams. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2: 613-619, 1977.
- 16) Sung DL, Chang CH, Harisiadis L et al: Primary radiotherapy for carcinoma in situ and early invasive carcinoma of the glottic larynx. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 5: 467-472, 1979.
- 17) Scrimger JW: Effect of air gap on absorbed dose in tissue. *Radiology* 102: 171-172, 1972.
- 18) 尾内能夫, 御厨修一, 安心院朗, 都丸禎三, 内田 勲 他: 頸部ファントムにおける⁶⁰Co γ線および各種エネルギーX線の線量分布の比較. 放治システム研究 Suppl 4: 89-92, 1987.
- 19) 新部英男: 喉頭, 放射線腫瘍学. 講談社, 東京, 1988, 200-205頁.
- 20) 尾内能夫, 都丸禎三, 阿部俊介, 稲田哲雄, 河内清光 他: 治療装置研究委員会報告. 放治システム研究 Suppl 1: 45-50, 1984.
- 21) Wilson CP: Treatment of intrinsic carcinoma of the larynx. *J Laryngol Otol* 75: 785-793, 1961.
- 22) Som ML, Silver CE: The anterior commissure technique of partial laryngectomy. *Arch Otolaryng* 87: 138-145, 1968.
- 23) Kirschner JA, Conn NH: Cancer at the anterior commissure of the larynx. *Arch Otolaryng* 91: 524-525, 1970.
- 24) Epp ER, Loughheed MN, McKay JW: Ionization build-up in upper respiratory air passages during teletherapy with cobalt 60 radiation. *Brit J Radiol* 31: 361-367, 1958.
- 25) Nilsson B, Schnell PO: Build-up effects at air cavities measured with thin thermoluminescent dosimeters. *Acta Radiologica Therapy Physics Biology* 15: 427-432, 1976.
- 26) Koskinen MO, Spring E: Build-up and build down measurements with thin Li-Teflon dosimeters with special reference to radiotherapy of carcinoma of the larynx. *Strahlentherapie* 145: 565-570, 1973.
- 27) 都丸禎三, 尾内能夫: 熱ルミネセンス線量計, 日本医学放射線学会物理部会編: 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, 1966, 76-80頁.
- 28) Mancuso AA, Calcaterra TC, Hanafee WN: Computed tomography of the larynx. *Radiologic Clinics of North America* 16: 195-208, 1978.
- 29) Mafee MF, Schild JA, Valvassori GE et al: Computed tomography of the larynx; correlation with anatomic and pathologic studies in cases of laryngeal carcinoma. *Radiology* 147: 123-128, 1983.
- 30) Mafee MF: CT of normal larynx. *Radiologic Clinics of North America* 22: 251-264, 1984.
- 31) 都丸禎三, 入船寅二: ファントム, 日本医学放射線学会物理部会編: 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, 83-88頁.
- 32) ⁶⁰Co γ線および高エネルギーX線, 日本医学放射線学会物理部会編: 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, 19-28頁.
- 33) Mittal B, Rao DV, Marks JE et al: Role of radiation in the management of early vocal carcinoma. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 9: 997-1002, 1983.
- 34) Webster EW, Tsien KC: Observations on the characteristics of isodose charts for X-ray and gamma-ray beams. *Atlas of radiation dose distributions vol. 1 Single-field isodose charts*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1965, pp 13-23.
- 35) Olszewski SJ, Vaeth JM, Green JP et al: The influence of field size, treatment modality, commissure involvement and histology in the treatment of early vocal cord cancer with radiation. *Int J Radiat*

Oncol Biol Phys 11: 1333-1337, 1985.

- 36) Spring E, Salmo M, Rissanen PM: The effect of the treated volume and cell survival fractions on the recurrence of carcinoma of the larynx in radiotherapy. *Strahlentherapie* 144: 18-21, 1972.
- 37) Salmo M, Rissanen PM, Spring E: A retrospective analysis of the recurrence of stage I carcinoma of the larynx in patients treated with X-rays and gamma radiation from a Co-60 unit. *Strahlentherapie* 145: 132-142, 1973.

稿を終えるにあたり、御指導と御校閲を賜った群馬大学医学部耳鼻咽喉科学教室 亀井民雄教授、御校閲を賜った群馬大学医学部放射線医学教室 新部英男助教授、直接の御指導を賜った群馬県立がんセンター松浦 鎮院長に深く

感謝いたします。また御助言と御協力を賜った群馬県立がんセンター境野宏治医療局長、岡佐竹文介頭頸部長、岡杉原志朗病理部長に深く感謝いたします。

またファントムの作製ならびに吸収線量の測定に多大の御指導と御協力を賜った群馬大学医学部放射線医学教室 野目一郎講師、群馬県立小児医療センター羽部 孝放射線部長、群馬県立がんセンター遠藤 廣放射線課主任ならびに同放射線課員各位に深く感謝いたします。

本論文の要旨またはその一部は第89回、第90回日本耳鼻咽喉科学会総会、第50回日本耳鼻咽喉科臨床学会、第13回日本頭頸部腫瘍学会、第27回癌治療学会において発表した。

(1990年2月28日受稿 1990年4月13日受理 急載)
別刷請求先 〒371 前橋市上小出町613-10 清水龍一