

第 42 回放射線治療分科会 シンポジウムから

1. 体幹部定位放射線治療の現状 –Stereotactic Body Frame を用いた治療–

京都大学医学部附属病院 矢野慎輔

1.はじめに

治療装置および技術の進歩に伴い、直線加速器を用いた高精度の定位放射線治療が可能になった。定位放射線治療はこれまで頭頸部においてはすでに保険制度が適応されかなりの施設で普及している。適応の条件は直線加速器により極小照射野で線量を集中的に照射する治療法において照射中心の固定精度が 2mm 以内とされている。この固定精度を維持できるのならば、全身のいずれの部位においても定位放射線治療が適応されるだろう。しかし、頭頸部以外の部位においては以下に述べる問題点があり、今後十分な検証が必要である。その内容としては、確実な固定は困難であるため治療中の患者動きを考慮する必要がある。また、再現性の確保が難しい、生理的な動きや日々の位置変動が大きい、機械的に治療方向が制限される等の対策が急務である。その中で体幹部定位放射線治療に対して現在大きく分類して下記に示す 3 方式(北大、防衛大、京大等)が検討されている。

A. 二体幹部定位照射用固定具を用いた照射法
(図 1)

B. 動体追跡照射法：透視画像を用い腫瘍内に刺入した金球の動き(病巣の動き)を追跡照射するシステム

C. CT・Linac 一体型照射法(寝台を共有)

B の動体追跡照射法(北大)は固定の概念を取り除き、治療中の患者動き、生理的な動きに対処可能なシステムである。C の CT-Linac 一体型照

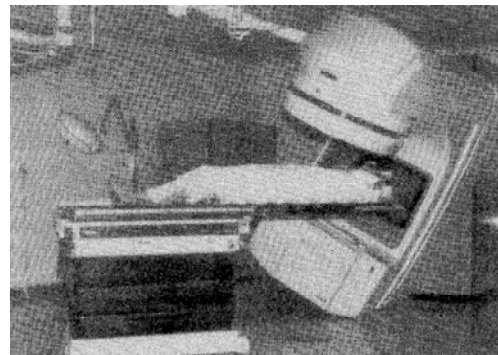


図 1. 体幹部定位照射用固定具を用いた放射線照射。

射法(防衛医大)では CT 装置と治療装置を同室に設置し寝台共有により照射前に CT 画像で位置確認を容易に行うことができ補正可能なシステムである。いずれのシステムも治療室の改造および装置の増設によりかなりの施設面でのコストが必要であり、今後多くの施設における普及を考えると限界がある。我々の行っている A の体幹部定位照射用固定具を用いた定位放射線治療¹⁾⁷⁾は前者と比較して安価であり、施設の改造の必要性はなく、治療精度が確保されるならば、普及する可能性がある。また、A から C の照射システムに対して Mini-Multileaf Collimator および IMRT を組み合わせることにより、重要臓器に近接する部位に対する照射や複雑な形状に対して理想的な線量分布をつくることことができる。体幹部定位照射用固定具を用いた照射法において現

状として何が問題点で、どこまで検証が進んでいるのか再確認し今後の普及に向けての方向付けをする。

2. Stereotactic Body Frame の特徴¹⁾

京大で使用されている Stereotactic Body Frame (ELECTA 社)の構造および各部の機能(図 2)について説明を行う。

固定具の形状は舟形で、その内部に微小発泡ビーズの入った吸引式袋を敷き、その上に患者が仰臥位で固定される。患者は両手を挙上した状態で、吸引式発泡袋の空気を抜き取り患者毎に体型に

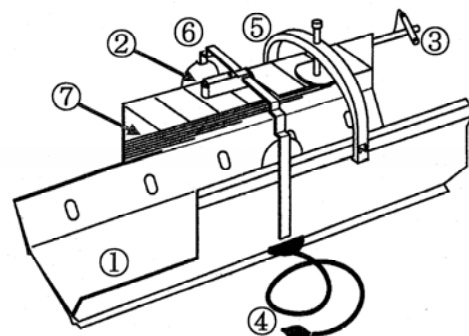


図 2. Stereotactic Body Frame の各部の名称。
①Body frame、②Chest marker、③Leg marker、
④ Level control、⑤ Diaphragm control、⑥
Stereotactic arch、⑦CT indicator.

合わせて発泡袋を形成させる。これにより患者は固定具に対し一定の位置に固定することができ、治療計画時の体位を再現することができる。

固定位置をより正確に再現するために胸壁用および脚用レーザーマーカー②③を利用し、また固定具と患者との接合ラインを体表面にマーキングする。固定具内部の発泡袋一式は、入れ替えによって同一期間に複数の患者に対し治療を行うことができ、繰り返し使用可能である。

固定具は三次元位置座標を有し、フレーム上部に取り付けられる Stereotactic arc、側壁スケールによって外部から三次元座標を合わせる事ができる。また、フレーム内部には金属ラインでできた CT 用スケール (⑦) が埋め込んであり CT 画像上でフレームの位置座標を読み取ることができる。その他、寝台の傾き補正用器具④、上腹部圧迫式呼吸抑制機構⑤、追加システムでは肺容量一定下照射法として ABC(Auto Breathing Control)システムが開発されている(現在のところ京大では使用していない)。CT 画像上では患者と固定具の間には発泡袋が満たされているため、舟形の中央部に体幹部が浮いている像となる。

3. 治療適応基準と治療までの手順

肺の定位放射線照射の対象は原発性肺癌ないし転移性肺癌が疑われる単発性孤立性肺腫瘍 (<4cm) を対象とし、かつ 30 分以上の治療寝台上での安静が可能であることを条件として症例を選択する。

治療方法は 1 回線量 12Gy で治療回数 4 回ないし 5 回(週 2 回)、総線量 48Gy ないし 60Gy で行っている。治療までの手順としては、治療計画の準備として患者体型に合わせた固定具の作成、呼吸抑制判定、CT 撮影、治療計画、照合用写真の撮影、データ転送までを実施する。治療は後日に行い、治療固定具を用いて患者位置を再現し照合確認作業を行い位置修正が必要な場合は修正し治療を行う。

4. 呼吸による病巣動きの抑制⁴⁾

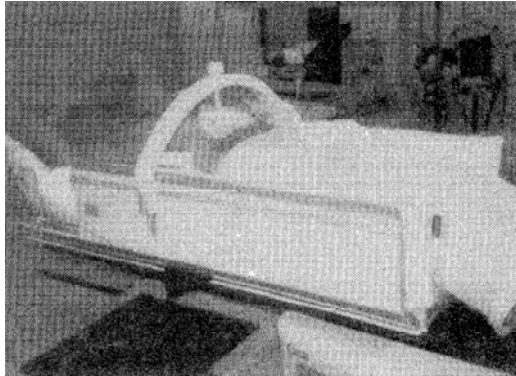


図3. 臨床における上腹部圧迫式呼吸抑制の使用例.

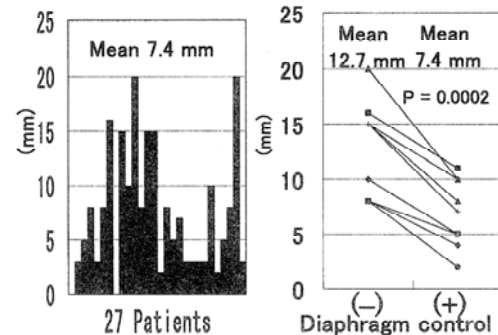


図4. 上腹部圧迫式呼吸抑制の効果

胸腹部の腫瘍（特に肺腫瘍）において、腫瘍の呼吸性移動を無視することはできない。通常は呼吸性移動により腫瘍が照射野から外れないように PTV に対し安全域（margin）をとるが、一回あたりの線量が大きい場合、正常組織の照射範囲は最小減にすることが望まれる。呼吸移動を考慮した照射法は大きく分けて以下のように分類できる。

A.患者能動的息止め法：音声同期

B.患者能動的呼吸抑制法：圧迫および酸素吸入

通気バルブ開閉法（ABC）

C.患者呼吸同期法：透視画像(動態追跡)を利用

排気容量検知式、CCD カメラ検知式

D.MLC 追跡式四次元照射法：自由呼吸下で動きに対し MLC が時間的に追従する

Stereotactic Body Frame では、上腹部圧迫式呼吸抑制機構を採用している。方法は固定具作成後 X 線シミュレータを用い呼吸による病巣の動き（安静呼吸下）を正側方向から透視下で三次元的に観察する。動きの大きさが呼吸吸気間で 8mm 以上観察された場合に、上腹部圧迫式呼吸抑制を行い再度呼吸抑制効果の確認を行う。この効果が確認された場合は使用し、十分な効果が得られない場合、あるいはさらに動きが大きくなる場合には適応から除外する場合もある。また、効果が確認された場合で呼吸苦を伴う場合は、酸素吸入の併用を行う。

臨床における上腹部圧迫式呼吸抑制の使用例を図3、上腹部圧迫式呼吸抑制の効果を図4に示す。図4左は27症例における病変部の呼吸性移動を示し、図4右は安静呼吸時に8mm以上の移動が確認された症例について上腹部圧迫による呼吸性移動の抑制を行った結果を示し、抑制前12.7mmが抑制後は7.3mmとなり、呼吸による病巣の移動を平均で約5mm抑制できた。

5. 治療に必要な測定事項

5-1. 固定具を用いた場合の照射可能範囲の計測¹⁾

体幹部用固定具を用いた定位放射線治療では頭頸部と比較して照射方向の幾何学的配置がかなり制限される。治療計画を行ったがその角度に設定できないと言ったことの無い様に、治療計画時に設定する治療寝台角度と Gantry 角度の設定可能範囲について幾何学的配置をあらかじめ計測しておく必要がある。また、病巣の位置によって寝台高さ、固定具位置等の幾何学的配置が変わり、Gantry 角度、寝台角度の可動範囲も変化する

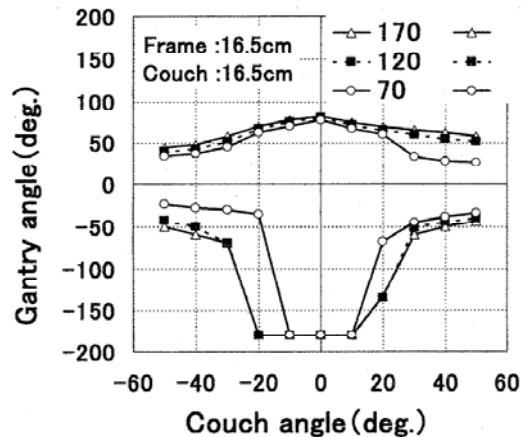


図5. 照射可能角度範囲の例.

ことを考慮に入れる必要がある。設定可能範囲の測定結果の一例を図5に示す。これは病変が右肺野にある場合で固定具を寝台中心から 16.5cm、寝台中心を患者左側に移動した場合の測定結果であり、寝台および固定具を移動させる理由は正側方向から Portal Image を撮影する際に寝台枠、支柱が障害にならないようにするためである。寝台高さ（病巣高さ）を 170、120、70mm と変化させると照射可能範囲が変化するのがわかる。

5-2. 固定具の線量減弱による標的基準線量への影響と補正法³⁾

体幹部用固定具を用いた場合に固定具自身の線量吸収があるため、標的基準線量の低下を引き起こす。線量精度を高精度に維持するためには、その影響が標的基準線量に対してどの程度あるのか把握しておく必要がある。治療計画において本来体幹部用固定具も外輪郭として体輪郭に含めるべきであるが、構造的に大きく計算エリアからはみ出す場合がある。また、CT 画像上体輪郭が固定具の中心部に浮いた状態（発泡袋の層が存在するため）で、表示されるため固定具も含めるのは困難が生じる。計算時間、計算エリアの増大を考え、現状では体輪郭のみを外輪郭として入力している。そのため、固定具の線量減弱による標的基準線量への影響を求めておく必要がある。そこで、ファントムを用い、照射角度と線量減弱の関係を測定した。当院では固定多門照射約 6、8 門が一般的であるが、このうち固定具にビーム線束がかかる割合は各症例によって様々である。臨床例において固定具による減弱の影響および減弱の補正法を検討

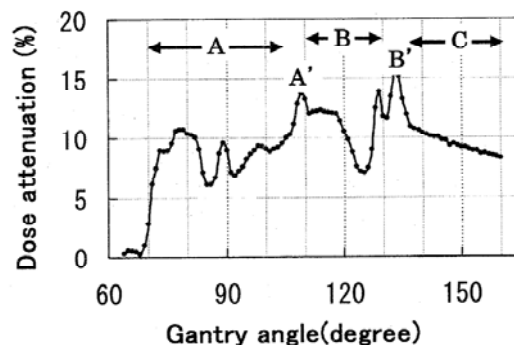


図6. 固定具による標的基準線量の減弱率
(A: 寝台側壁、B: 寝台斜台、C: 寝台底部)

した。固定具による線量の減弱を測定した結果を図6に示す。

この結果から固定具に線束がかかる場合は約9.3%の減弱があることがわかる。臨床においては線束が病巣に到達するまでに固定具を通過する照射門に対して9.3%の線量補正を行っている。臨床における線量の補正例を表1、臨床例25人における補正効果を図7に示す。線束が固定具にかかる場合に一律9.3%の線量補正をすると総標的基準線量に及ぼす減弱による影響を平均で4.5%（最大7%）減らすことができる。

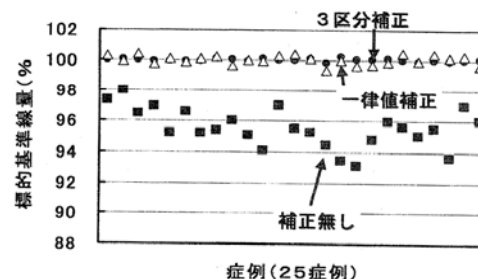


図7. 標的基準線量への影響（25症例の減弱補正）.

表1. 臨床における減弱補正の1例（標的基準線量の変化）

Plan #	Angle (°)		Frame 区分	補正(-)	補正(+) 減弱率 9.3%
	Couch	Gantry			
1	0	180	C	8.3	-1.0
2	0	245	B	12.2	2.9
3	20	230	C	11.8	2.5
4	40	315	-	0.0	0.0
5	340	220	C	10.4	1.1
6	320	300	-	0.0	0.0
Average (%)				7.1	0.9
標的基準線量の変化率(%)				92.9	99.1

5-3. 固定具による患者皮膚表面線量への影響³⁾

高エネルギーX線の照射を行った場合には表面付近の線量は電子平衡の成立していないビルドアップ領域により皮膚保護効果が期待できるが、体幹部用固定具を用いた場合には固定具からの二次X線によりがあるため、皮膚線量の上昇を引き起こす。特に、胸壁に近い部位への照射は、線束の入射部および射出部が同じ皮膚領域で重なり皮膚線量の増加が無視できない場合がある。そこで固定具の内側にファントムを置き平行平板形電離箱線量計を用い固定具の有無による表面線量を比較した。結果は固定具の使用による皮膚線量の上昇は、基準点線量に対し固定具がない場合16%の表面線量が固定具有りで76%となり、約60%の線量増加が確認された。体幹部用固定具を用いた定位放射線治療では一回線量が大きいいため皮膚領域での線量の重複に注意を払う必要がある。

5-4. 不均質部および小照射野における計算精度

不均質かつ小照射野における計算精度の評価は前方および側方向の荷電粒子平衡が成立しない

ためにその癌組織の表層部では線量が不足する。臨床に近いモデルを用いて、不均質部小照射野計算精度を評価し、最も精度の高い計算法および臨床における留意点について検討した。

現在 Cadplan6.1.5 の線量計算アルゴリズムは

Convolution 法で不均質部領域の補正項として CF が乗じられる不均質部補正項には Modified-Batho 法、Generalized-Batho 法、Eq-TAR 法、補正無しが選択できる。

1. 均質物質中における計算精度は小照射野 (3cm 以下) 条件において、どのアルゴリズムも実測値と比較して 1% 前後であるが、不均質モデルでは各アルゴリズムで 3×3 cm 以下の小照射野での計算誤差が大きく 10% を越える過

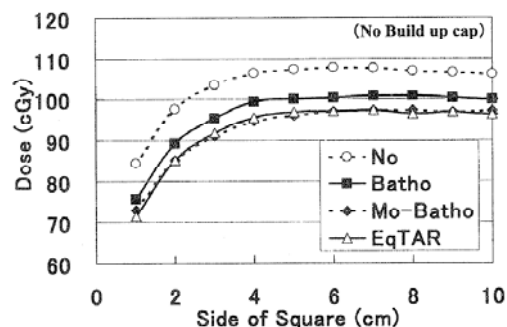


図 8. 低密度不均質物質における各アルゴリズムの計算精度の比較 (Mix-Dp 3cm+cork 5cm).

小評価のものもあった (図 8)。Modified-Batho 法より Generalized-Batho 法が実測値に近い値を示し精度良く補正できた。

2. 固定具+肺野モデルを想定した不均質モデルは固定具の有無に関わらず 1 の均質低密度モデルの結果と同様であった。

3. 不均質物質中の病巣表層部モデル (ビルドアップキャップ無し) では病巣中心部モデル (ビルドアップキャップ有り) と比較し 3×3 cm 以下の小照射野で各アルゴリズムにおいて計算誤差が大きかった。

臨床上の現象として、肺野において小さな癌組織が存在し、これに高エネルギー光子で照射を行う場合、前方および側方電子平衡の崩れが原因してその癌組織の周辺部には十分な線量が入らないことがおこる。

孤立した肺野病巣を想定し微小容積において、このことを前提にした線量評価を行った結果は、肺野の孤立した病巣表層では小照射野において線量が過小評価となった。小照射野不均質部では実測値に近い値を示したのは G-Batho 法であった。これらの結果から、治療計画装置における最適アルゴリズムおよび不均質補正法を選択し、計算誤差を把握した上で治療計画を行うことが必要である。

6. 固定具を用いた場合の再現性精度⁴⁾

治療照合の方法:

1. 治療計画時に CT スキャン後、正側 2 方向から Simulation Image の撮影
2. Stereotactic Body Frame のスケールを用いて体位設定
3. 治療直前に体位設定後、正側 2 方向から Portal image を撮影しアイソセンタの照合

4. Simulation Image と Portal Image の比較位置照合は左右(L-R)方向、背腹(A-P)方向、頭尾(Cranio-Co11dal)方向の誤差を計測し三次元の設定誤差を評価する。比較はアイソセンタ周辺の骨格において数カ所の点において医師、技師 2 名以上で目視にて評価している。臨床における再現性の結果を各方向および距離についての再現性誤差を図 9、そのまとめを表 2

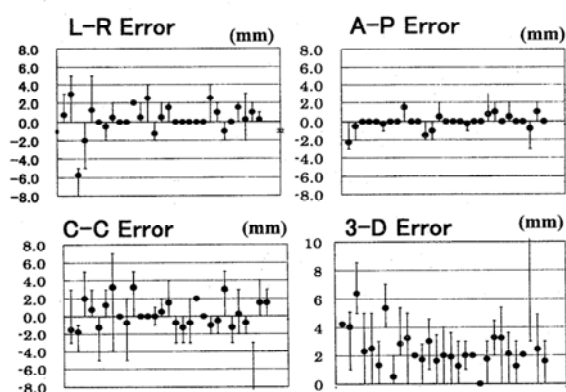


図 9. SBF による照合精度 (3D 方向、距離)

に示す。体位再現精度は 84.8%で 5mm 以内であった。再現精度は症例による差が大きく、頭尾方向の誤差が他の方向に比べて大きかった。他施設との比較を表 3 に示す。

表 2. アイソセンタ位置の再現精度 (27 症例)

	累積比率 (%)			
	< 2 mm	< 3 mm	< 5 mm	≤ 8 mm
左右方向	64.7	86.2	93.1	100.0
背腹方向	82.8	95.7	100.0	100.0
頭尾方向	55.2	71.6	91.4	97.4
直線距離	27.6	60.3	85.3	96.6

表 3. 他施設の固定法との比較

	L-R (mm)	A-P (mm)	C-C (mm)	Region	固定具
1) Halperin	7.1	10.0	10.0	Lung	T-bar
	10.4	10.8	7.1	Lung	Expanded foam
2) Fiorino	7.1	8.6	6.5	Pelvis	Alpha-cradle
	4.7	5.1	5.3	Pelvis	Alpha-cradle
3) Lax	5.0	5.0	8.0	Liver, Lung	SBF
Kyoto Univ.	6.0	4.0	7.0	Lung	SBF

SBF: Stereotactic Body Frame

設定誤差の 95%信頼区間上限値あるいは 2SD

他施設との比較では固定具の種類に関わらず、同等以上の精度であった。しかし、Portal Image による評価法は、厳密に言えば病巣自体が確認できている訳ではない。このため、治療後数例において体位変換しないで CT 撮影を行い三次元的に再現性を計測し、二方向からの Portal Image による照合と比較検討した。その結果、CT 画像上骨格等は治療計画時の位置が再現できている場合でも病巣部分が 1cm 程度ずれている場合があった。CT のスライス厚 (3mm) により頭尾方向の解析誤差はあるが、骨格のみの照合では病巣そのものの位置を必ずしも照合できていないこ

とが確認された。

京大では呼吸の動きによる PTV の位置入力誤差を防止するために自由呼吸下（上腹部圧迫式呼吸抑制を行った状態）で 1 スライス 4 秒スキンの条件で計画情報を取得し、さらに患者個々の呼吸による病巣位置大きさに応じて PTV に三次元方向にマージンを追加することで病巣が照射野から外れることのないように対応している。なお、Portal Image の評価では 2mm 以上の誤差が確認された場合、修正後に照射を行っている。特に、分割数の少ない定位照射では、毎回の照合画像による確認が必要である。

7. 治療計画における照射法の比較²⁾

体幹部定位放射線治療において Non-coplanar 固定多門照射と多軌道運動原体照射の治療計画を比較し、その現実的な照射法について検討した。当院で治療を行った直径 4cm 以下の孤立性肺腫瘍の臨床例 27 例（1998 年 7 月から 2000 年 2 月）を対象とした。治療計画は Cadplan（Varian 社）を用いて症例毎に治療計画を作成し比較検討した。

Non-coplanar 固定照射(2 門、3 門、4 門、6 門、8 門、10 門)の 6 種類および多軌道運動原体照射（1 アーク、3 アーク、5 アーク、7 アーク）の 4 種類とした。その評価は下記の 1 および 2 の項目に関して容積線量・線量分布曲線等について比較を行った。

1. 腫瘍の線量（最大線量、最小線量、均一性）
2. 周辺臓器(患側肺線量、照射容積、脊髄)の線量

腫瘍内線量の均一性および患側肺の 20Gy 肺容積ともに、Non-coplanar 固定多門照射は 6 門以上、多軌道回転原体照射では 3 アーク(300°)以上で大きな差がなかった。具体的には、腫瘍内の均一性は腫瘍容積が 25cc 以上の場合に最低線量が 90%以下であった。20Gy 照射肺容積は腫瘍容積が 12cc 以上、かつ腫瘍位置が縦隔近傍の場合に 10%を超えた。

8. まとめ

体幹部用固定具について

- ・ 非侵襲的であり、繰り返し使用可能で従来装置を利用できる。
- ・ 照射可能範囲の計測をあらかじめ行うことにより、計画の効率化につながった。
- ・ 線量減弱による標的基準線量への影響を把握し線量補正を行うことにより線量精度が向上した。
- ・ 皮膚線量の増加があるため、特に線束が重なる部分において注意が必要である。
- ・ 呼吸による病巣の移動抑制ができ、照射範囲を小さくできた。
- ・ 一方、呼吸抑制および長時間にわたる同一姿勢は患者負担が大きい。

照合について

- ・ CT による解析の結果から、2 方向の Portal image による骨格位置での照合方法では病巣位置を正確に照合できない場合がある。
- ・ 再現性は患者体型によって差が有り、頭尾方向の誤差が大きかった。
- ・ 他施設との比較においては同等以上の精度であった。

治療計画について

- ・ 肺の定位放射線治療における照射法は、Non-coplanar 固定多門照射なら 6 門以上、多軌道回転原体照射なら 3 アーク(300°)以上が必要であると考えられた。
- ・ 腫瘍の大きさが 25cc 以上、かつ腫瘍位置が縦郭近傍にある場合に腫瘍の線量不均一および肺野線量の増加がみられ十分注意が必要である。
- ・ 不均質部における小照射野照射では 3×3cm 以下の小照射野での計算誤差が大きく 10%を超える過小評価のものもあった。実測値に近い値を示したのは G-Batho 法であった。

9. 今後の検討課題および方向性

体幹部用固定具を用いることで高精度の体幹部定位放射線治療が可能となった。体幹部における治療において、患者自身の体動、生理的な動き(呼吸、拍動、嚥下、消化管動き、尿量変化)に伴い腫瘍の動きが必ず存在する。

固定具を用いた定位放射線照射において今後さらに精度を高めるには、固定具の改良と再現性評価の個別化により位置精度をさらに向上させ、患者負担を軽減させることが望まれる。また、呼吸同期システムの導入、病変部を的確にとらえた照合法の検討、照射中のモニタリング法(治療中の動きの評価)の検討を考慮する必要がある。

今後の治療の方向としては腫瘍の動きに対応した放射線照射技術(体内マーカ、体外マーカ)を取り入れた四次元的な放射線治療が必要である。

本研究報告は日本放射線技術学会第 55 回、56 回、57 回総会学術大会において発表し、第 1 報から第 5 報の内容のまとめである。また、照射可能範囲の計測および線量の補正法等の詳細は 2002 年 1 月発行予定である Vol.58/No.1 において掲載(古賀祐子原著)が予定されており詳細は参照して頂きたい。なお、発表の場を与えてくださった分科会に感謝の意を表するとともに、本研究に当たっては同治療部門技師ならびに古賀祐子氏(北野病院)の協力のもとに達成できたことをここに報告する。

参考文献:

- 1) 古賀祐子ほか:肺の定位放射線治療 -第 1 報-体幹部用固定具の使用経験,日本放射線技術学会

雑誌,第 55 回総会学術大会発表後抄録,34 は,1999.4

2) 矢野慎輔ほか：肺の定位放射線治療－第 2 報・治療計画の最適化－,日本放射線技術学会雑誌,第 55 回総会学術大会発表後抄録,343,1999.4

3) 古賀祐子ほか：肺の定位放射線治療－第 3 報－体幹部用固定具の投与線量に及ぼす影響,日本放射線技術学会雄藩,第 56 回総会学術大会発表後抄録,12,2000.4

4) 矢野慎輔ほか：肺の定位放射線治療－第 4 報-SBF の照合精度,日本放射線技術学会雑誌,第 56 回総会学術大会発表後抄録,6,2000.4

5) 笹井啓資ほか:リニアックによる定位放射線照射（現状と展望）,Japanese Journal Clinical Radiology, vol. 44, 1617-1623, 1999

6) 永田靖ほか:体幹部腫瘍に対する定位放射線照射,日本医学物理学会, vol. 21, 28-34, No.1, 2001

7) Ingmar Lax, “Extracranial Stereotactic Radiosurgery of Localized Target,” Journal of Radiosurgery, vol. 1, No. 2, 1998.