

Figure 16

Response 2

- Significant deviation caused by gantry bending can not be cancelled.
- The isocenter should be defined at the center of the deviation range caused by gantry bending.

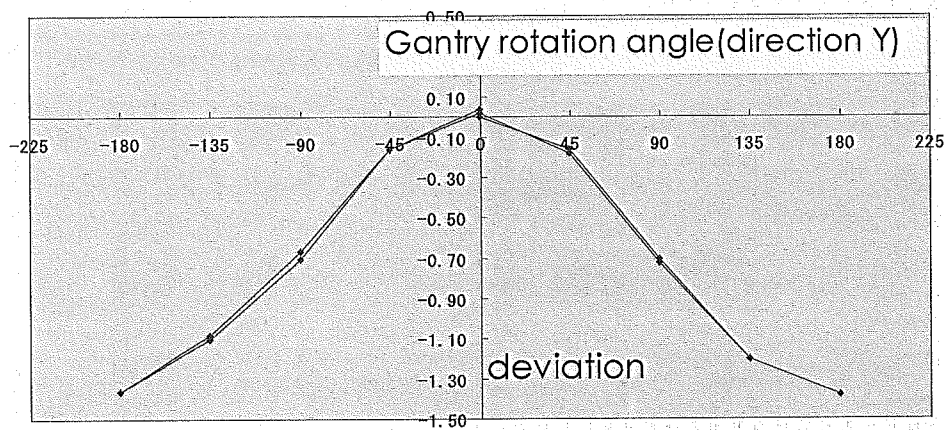


Figure 17

Response 2

- Significant deviation caused by gantry bending can not be cancelled.
- The isocenter should be defined at the center of the deviation range caused by gantry bending.

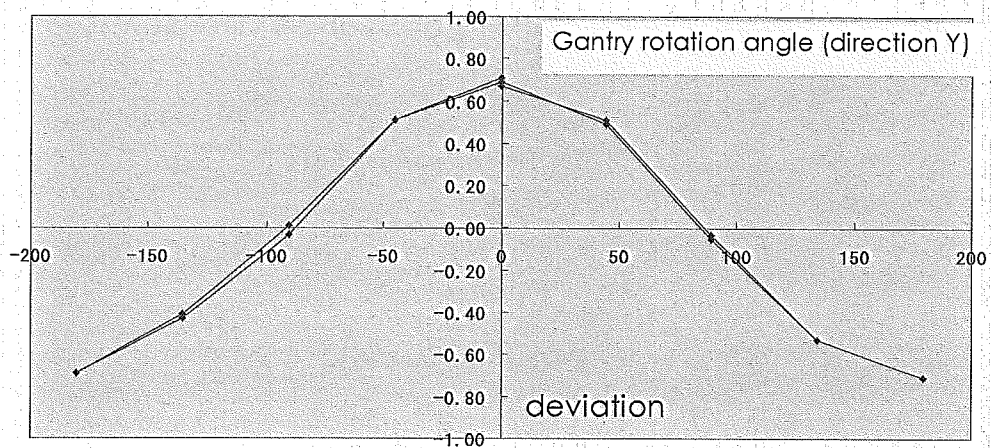


Figure 18

カウチスタビライザー

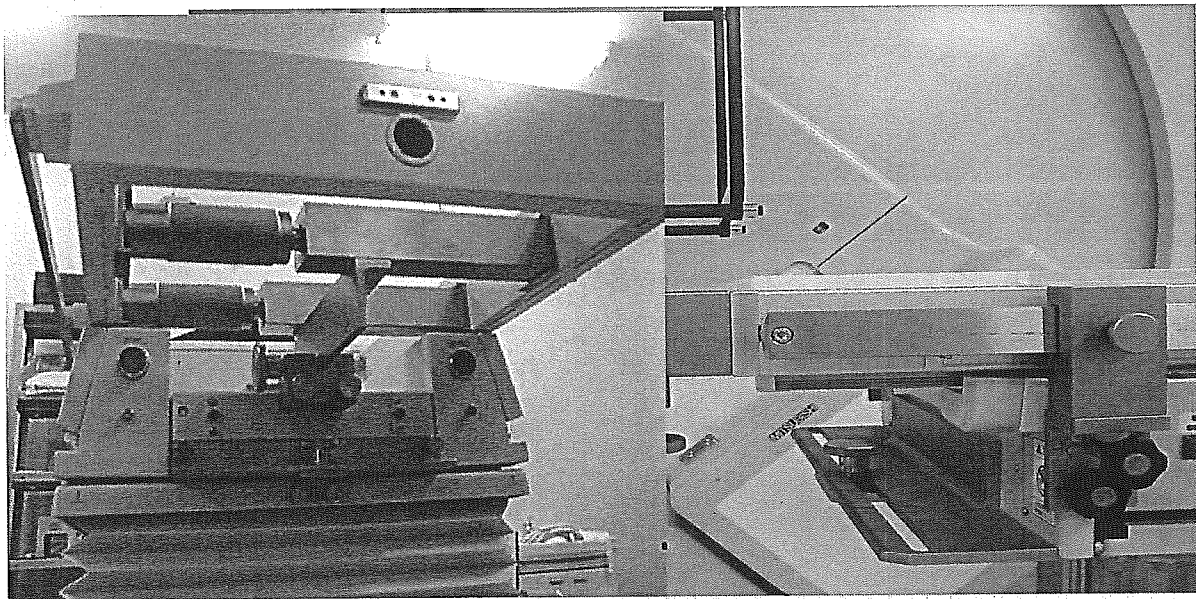


Figure 19

治療寝台回転精度 (カウチスタビライザー取り付け無し)

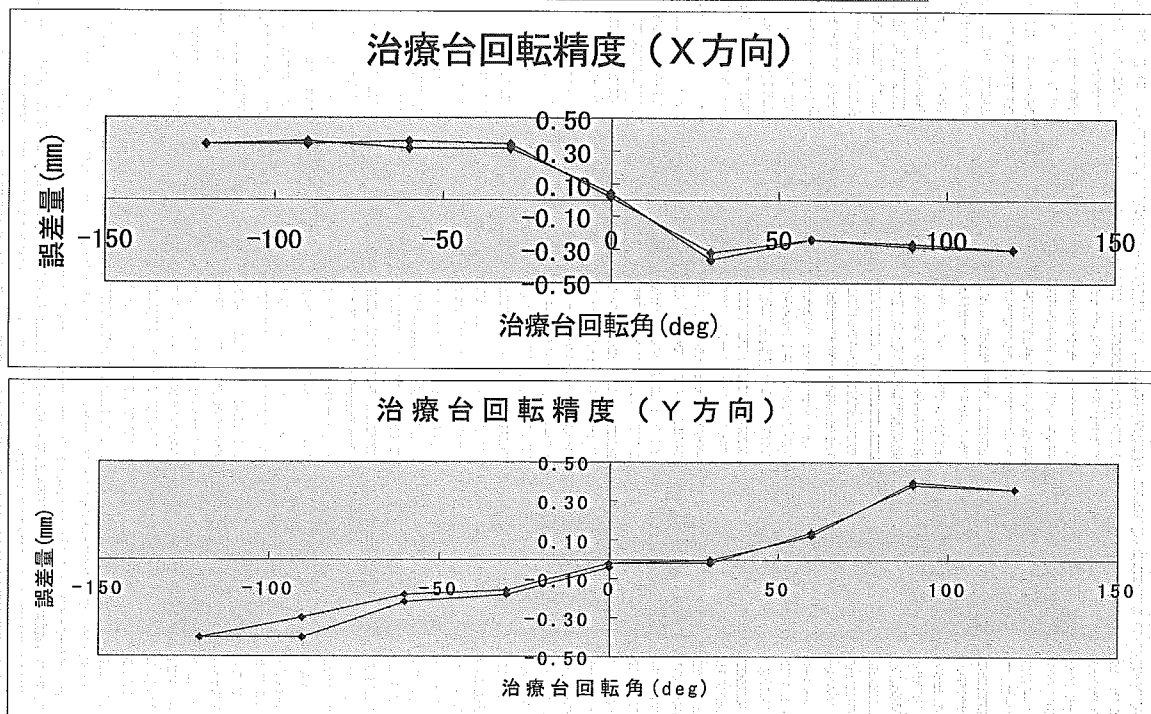
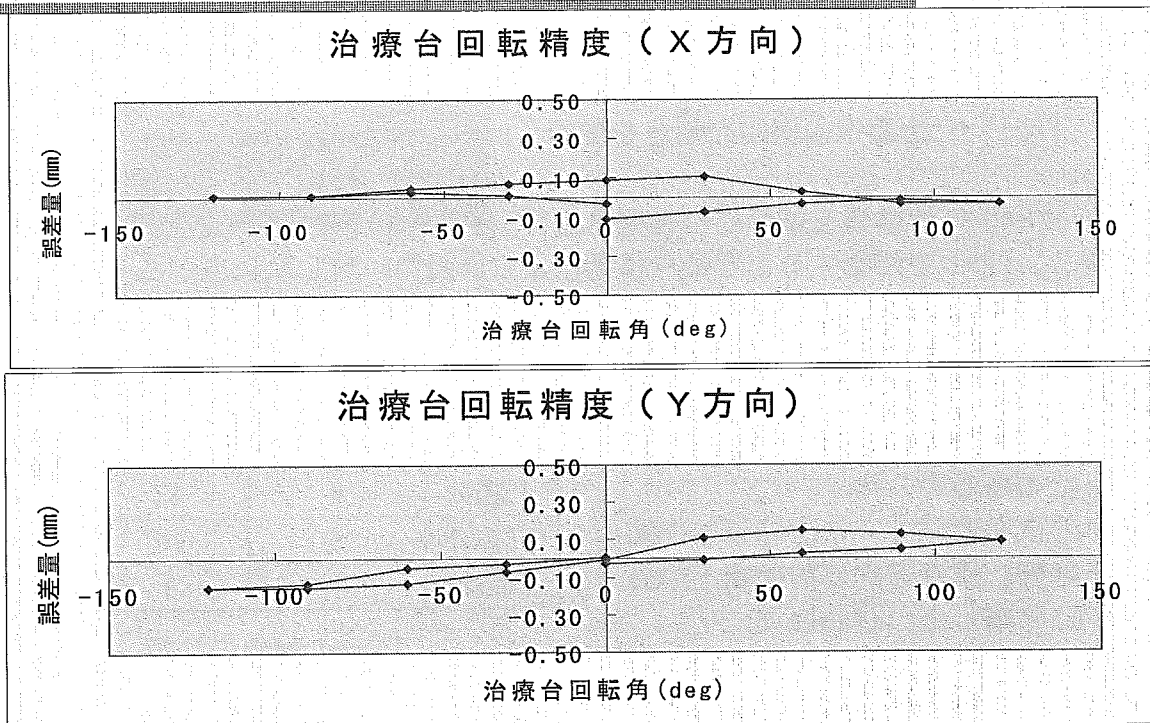


Figure 20

治療寝台回転精度 (カウチスタビライザー取り付け有り)

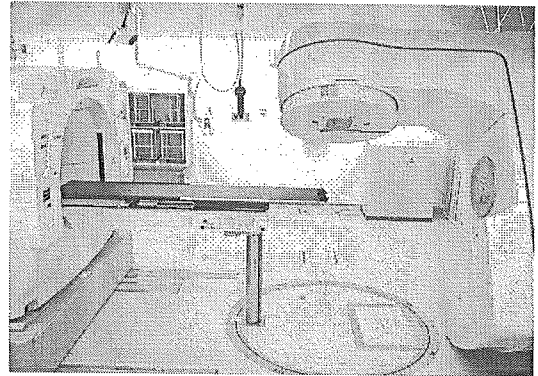


分担課題 定位照射における精度保証技術を中心に
高精度放射線治療の技術評価に関する研究

分担班員 山下 幹子 先端医療センター
精度研究項目 5 : CT-Liniac システムを用いた位置照合

【目的】

肺定位放射線治療 (SRT) では高精度な位置照合が日々の治療において必要とされる。当センターでは CT リニアックシステムを用い、毎回治療前に CT 撮影し、微調整後に治療を行っている。また、治療中は Flat Panel Portal Image (FPPI) で治療中の標的の動きを確認している。



CT を使用して骨構造を基準に位置照合を行った場合、FPPI で確認すると呼吸性移動により計画に一致しない事がある。そこで、位置照合時の CT 画像を用い、肺の部位別による呼吸性移動を解析した。

【方法】

対象は、肺 SRT (48Gy を 4 日間で治療) を行った 100 名とした。

肺の部位を頭尾方向に上肺野・中肺野・下肺野、腹背方向に前壁側・中央・後壁側に分類した。(Table.1)

	前壁側	中央	後壁側
上肺野	6	17	18
中肺野	9	17	16
下肺野	1	7	9

Table1.対象の分類

皮膚マークを元に位置決め後 CT 撮影を行い、治療計画画像と骨構造および標的の誤差を求め、骨構造と標的間の誤差を算出した。なお、初回治療時の位置決め画像を基準にした。また、5mm ずつ各方向にずれた場合の線量分布や DVH への影響を検討した。

【結果および考察】

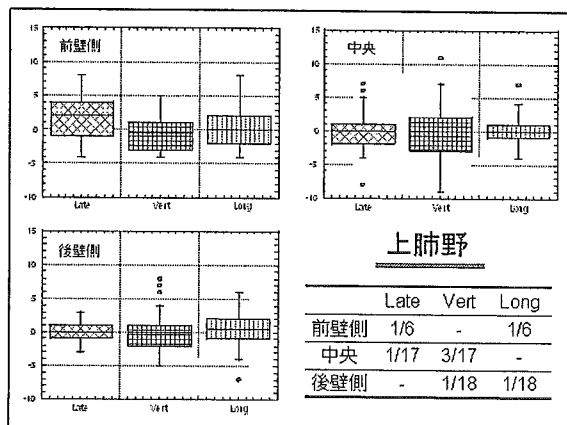


Fig.1 上肺野の変動

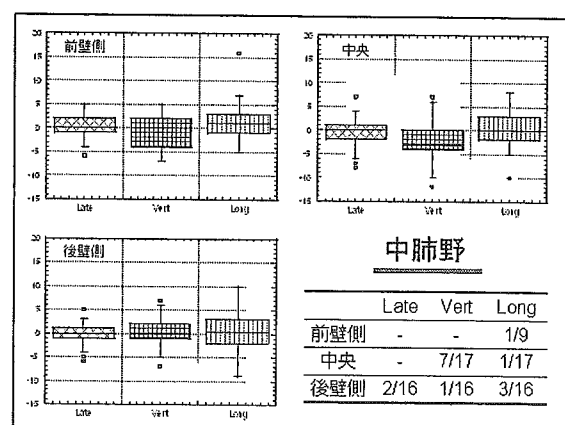


Fig.2 中肺野の変動

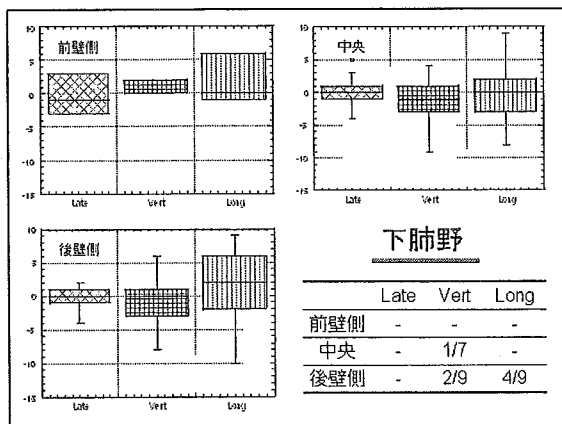


Fig.3 下肺野の変動

Fig内の表は5mm以上誤差のあった人数/母数を示す。なお、Late は左側が+方向、Vert は腹側が+方向、Long は頭側が+方向である。

中肺野および下肺野では頭尾方向への誤差が大きく、肺野中央は背腹方向、後壁側は頭尾方向への誤差が大きかった。

また、各方向に5mmズレた場合、分布はPTVを95%領域でカバーできておらず(Fig.4)、DVH(Fig.5)においても線量不足となった。

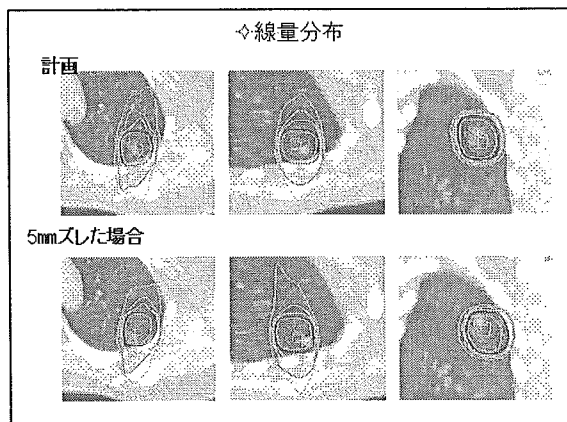


Fig.4 線量分布への影響

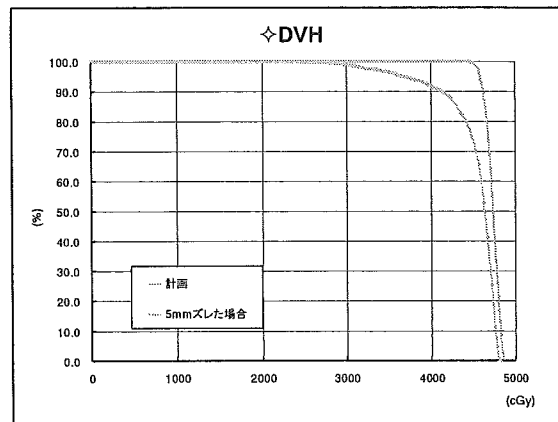


Fig.5 DVH への影響

今回の結果から、治療計画CTを撮影する際、一定の呼吸をするように指導を行ったり、呼吸のモニタリングを行ったりする事が重要であることが示唆された。さらに、FPPIを用いて個々の呼吸移動および肺の部位別による移動特性を考慮する必要がある。

CTリニアックシステムを用いた位置決め法は、各施設においてバラバラであり、確立されていないのが現状である。実際には呼吸を監視しながらCT撮影を行っている施設もあるので、今回述べた結果は位置決めを行う際の注意点として捉えていただきたい。

分担課題 定位照射における精度保証技術を中心に
高精度放射線治療の技術評価に関する研究

分担班員 矢野 慎輔 京都大学医学部附属病院 放射線部
精度研究項目 6：体幹部用固定具を用いた定位照射

京都大学医学部附属病院 放射線部、1)同 医学研究科 放射線腫瘍学・画像応用治療学
矢野慎輔、中田 学、岡田 孝、高倉 亨、永田 靖1)、高山賢二1) 松尾幸憲1)、則久
佳毅1) 平岡真寛1)

緒言

体幹部定位放射線治療は、装置および技術の進歩によって、さらに高精度な治療となつた。京都大学では本治療において体幹部専用固定具 (Stereotactic Body Frame) を用い、現在 (2006 年 3 月) までに約 160 人を治療し局所制御率 90%以上という良好な成果をあげている。本治療法は手術と同等の成績で、合併症少なく安全 (有症状<3%) であり、日本で増え続ける高齢者にも適応が可能である。また、1~2 週間の入院で治療完了でき、外来治療も可能である。本報告書では、比較的安価で精度の高い照射をおこなうことができる体幹部用固定具の使用法と注意すべき点について過去のデータに基づき報告を行なう。

体幹部定位照射に関する研究報告

我々は、本治療法を開始するにあたって、技術的に求められる項目として、最適な照射法、照射野のサイズ(マージン)、呼吸による動き、再現性、固定具の線量吸収、不均質部の計算精度について検討した。これまでに、日本放射線技術学会における研究報告を以下に示す。また関係する参考文献について巻末に記載する。¹⁻¹⁰⁾

- ・第 1 報 (1999)：治療法の概略と照射可能有効角度の測定
- ・第 2 報 (1999)：治療計画における照射方法の最適化
- ・第 3 報 (2000)：固定フレームの線量吸収補正法
- ・第 4 報 (2000)：位置再現性の検討
- ・第 5 報 (2001, 2003)：定位照射における不均質補正法の線量精度評価
- ・第 6 報 (2003)：体系的な許容値の設定

治療法の概要

本治療法は高精度体幹部用固定器具を用い、治療中に患者体位を一定に保持した状態で病変部位を正確に位置付けし (Fig1)、直線加速器により 1 回 12Gy、計 4 回ないし 5 回の分割治療にて総線量 48Gy (60Gy) を集中的に照射する治療法である。体幹部に対する照射は頭頸部と異なり可動性が高く、さらに呼吸による病巣位置の変動、心臓の拍動などの生理

的條件を十分考慮する必要がある。本治療法では呼吸による病巣の動きに対しては、呼吸抑制器具や、治療計画時 CT 撮影において位置の変動を考慮している。

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 (< 5 cm) 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している。

使用機器・器具 CT-Simulation : SCT7000T (Shimadzu)

X-Simulator : SAT20A (Shimadzu)

治療計画装置 : ECLIPSE/CADPLAN (varian)

治療装置 : CLINAC2300C/D, MLC1cm/40pair (varian)

体幹部固定具 : Stereotactic Body Frame (ELEKTA) (Fig2)

CT-Scan 条件 : 4sec/1slice/1-3mm pitch/1-3mm width

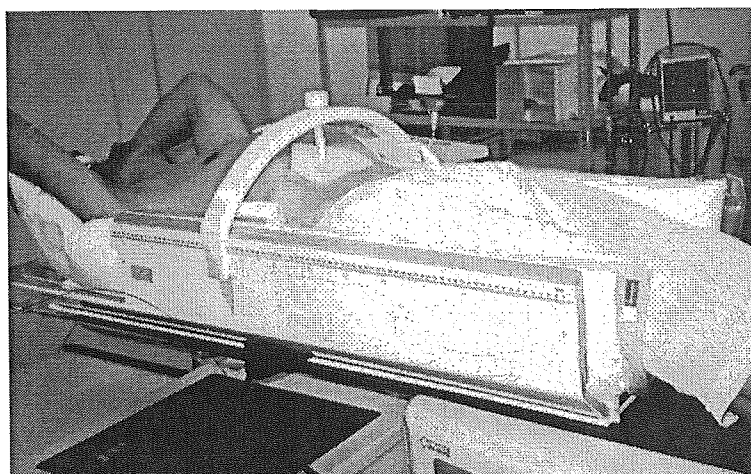


Fig1

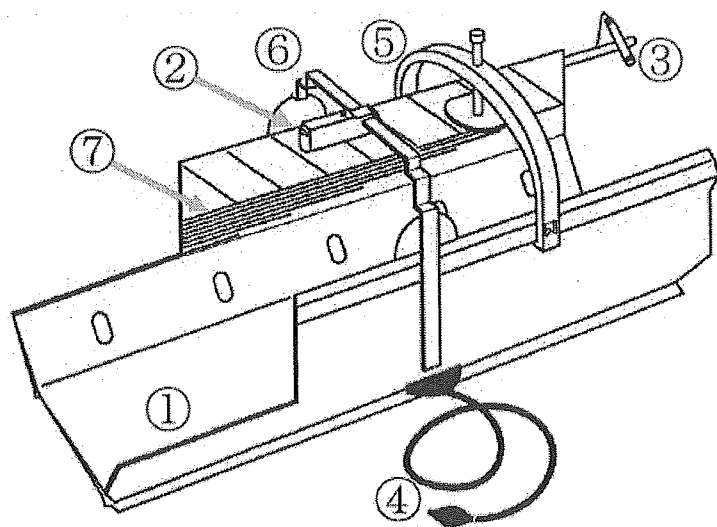


Fig2

体幹部用固定具について

Stereotactic Body Frame は体幹部専用の固定具（エレクトタ社）であり、同時に位置精度確認機能を持ち合わせています。また、腹部圧迫体が付属しており、呼吸性移動を抑制することが可能である。使用方法について以下に説明する。

- ①患者には予め手順、方法を説明し毎回治療時に繰り返し出来るように学習を促す。固定具作成時にはCT撮影時等に固定具の移動がスムーズにスライドできるようにテフロンシートを下面に敷くこと。また、固定具内には繰り返し使用するため、吸水性のシートを全面に敷き患者ごとに取り替え、衛生面で気をつける。
- ②患者体位の再現性のために、寝台高さ位置を記録し、足側から立位、座位、仰臥位の順で患者の体位ねじれが発生しないように真っ直ぐに固定具内に寝てもらふ。
- ③ 臥位で固定具内にセットされたバキュームピロウで体形に合わせて両手を挙上した状態で体位を固定する。バキュームピロウは、体形（Volume）に応じて大小の2タイプの何れかを選択する。バキュームピロウ内には患者の形状にあった発砲枕を組み合わせる。
- ④ 患者固定後は患者体位と固定具の関係が再現できるように、レーザーマーカを用い胸壁および下肢にマークを記入する。また側胸壁、上腕部等の固定具との接面にマークを記入する。
- ⑤ CT撮影までに長時間を要する場合は、CT直前、直後に再度レーザーマーカ、皮膚マーカを確認（修正）する。胸壁マーカは患者軸の回転を防止するために左右上下に計10点を記録する。

治療手順

治療計画の準備は、CT寝台上で患者のフレーム固定およびマーキングを行った後に、同室に設置してある X-Simulator で病変の呼吸性移動の評価を行い、呼吸抑制器具の使用を決定する。呼吸等により病巣部の移動が大きい場合は、呼吸性移動対策として上腹部圧迫による呼吸抑制器具を使用し、場合により酸素吸入を組み合わせる最適化を図る (Fig. 3)。

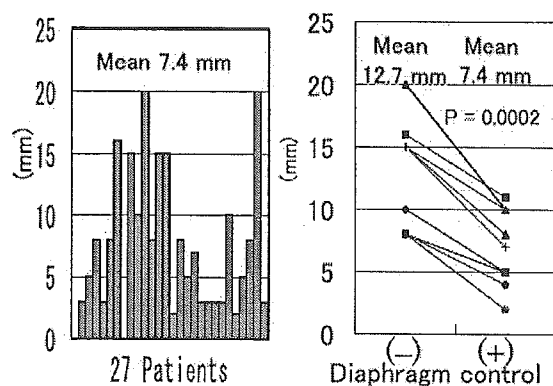


Fig. 3

撮影後に直ちに CT 画像上に問題の無いことを確認し、ITV 中心 (Isocenter) 座標を決定する。座標は CT モニター上で決定し、SBF 座標計算ソフトを用い変換座標値を算出する。座標の決定後、CT 撮影時と同様の体位のまま、共有寝台の X 線シミュレータにより正側 (0 度、270 度 : 右肺病巣時あるいは 90 度 : 左肺病巣時) の撮影画像を取得する。照合画像は、椎体骨等が十分確認できる画質、範囲を確保する。マーキング後、患者は退室しこの時点までに約 2 時間を要する。

治療計画は 4, 5 時間を要しプロトコールに従って実施する。

治療は CT 撮影の 6 日後から開始され約 1 週間以内に 4 (5) 日実施される。治療前に毎回、照合 Portal Film 撮影を行い、再現性の確認および修正後、治療が実施される。治療は 6 門から 10 門の固定多門照射で、患者毎に線量分布を考慮し任意に角度、重み付けを調整している。入室から退室までに約 30 分から 1 時間を要する。

照射野の設定方法

当院における CT-S 撮影は、呼吸位相を出来る限り多く含んだ条件 (long time scan 法) で撮影し、標的容積の過小評価を防止するよう考慮している。

CT image 上で標的部関心領域を設定し、これを病巣の動きを含んだ ITV (Internal Target Volume) とし、照合精度データにより SETUP Margin 5mm を 3 次元方向に設定し PTV とする。

($PTV = ITV + Setup\ margin$) さらに MLC margin として 5mm を三次元方向に加え照射野を設定する。(Irradiated volume = $PTV + MLC\ margin$) したがって治療時には、毎回再現性を確認し、検出された 2mm 以上の位置誤差をすべて修正し標的部辺縁が margin 内で照射されるように考慮している。また、病巣部位置の確認のため随時治療後 (前) に CT 撮影を行い骨格、肺野部位置を評価している。

照射可能有効角度および固定具の線量吸収補正法

体幹部における治療では頭頸部と異なりガントリーおよび寝台、固定具の配置 (クリアランス) が大きな問題となる。そこで病巣位置のパターン毎に照射可能有効角度をマッピングし治療計画時に利用することにより円滑に治療を行うことができた。クリアランスは症例ごとに病巣位置によって寝台位置が異なり、制限されるガントリー可動範囲が変化した (Fig4)。

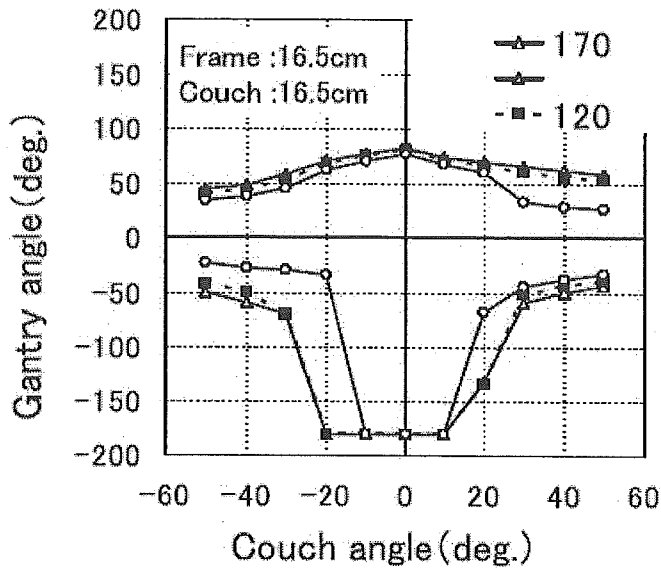


Fig4

次に照射野設定が固定具に重なる場合に Phantom を用いて測定した結果、1 照射門当たり最大で 15% を超える線量吸収があることが確認された。この場合、臨床データにおいて Body frame の減弱を補正しない場合、標的基準線量に対し平均 4.5% (最大 7%) の線量減弱があることが計算上確認された。当院では固定具に重なる場合は 1 門あたり一律 9.3% の線量補正を行うことにより線量減弱を 5% 以下に抑えることが可能となった。^{1,3,5)} (Fig5)

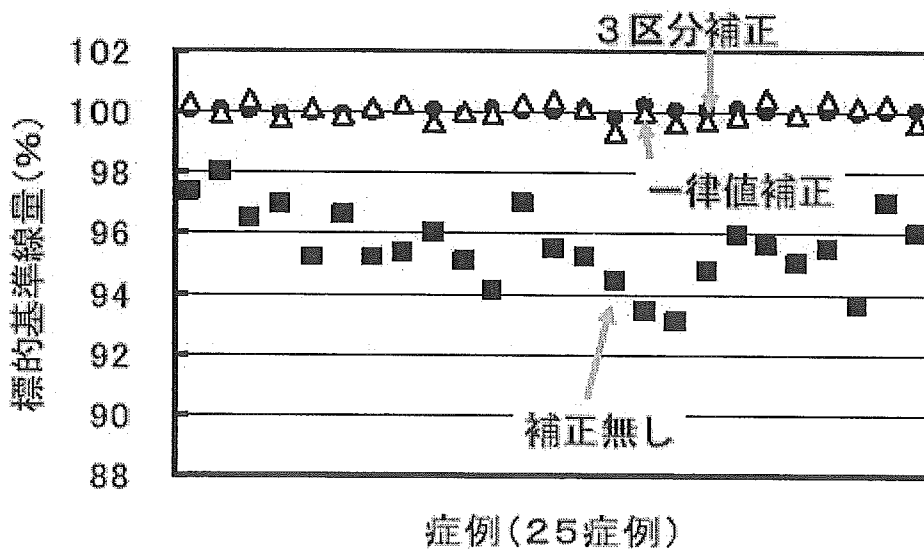


Fig5

位置再現性の検討

固定具の使用により、呼吸による病巣の移動が平均約 5mm 抑制でき精度の向上になった。毎回治療前に確認した位置修正前の体位再現精度は、84.8%で 5mm 以内であった。再現性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。(Fig6, Table1) 現状において体位再現精度を 5mm 未満にするには、治療時に正側方向からの照合確認および位置の修正を毎回行う必要がある。本固定法は体位再現精度を向上させるために有用であった。^{4,6,7)}

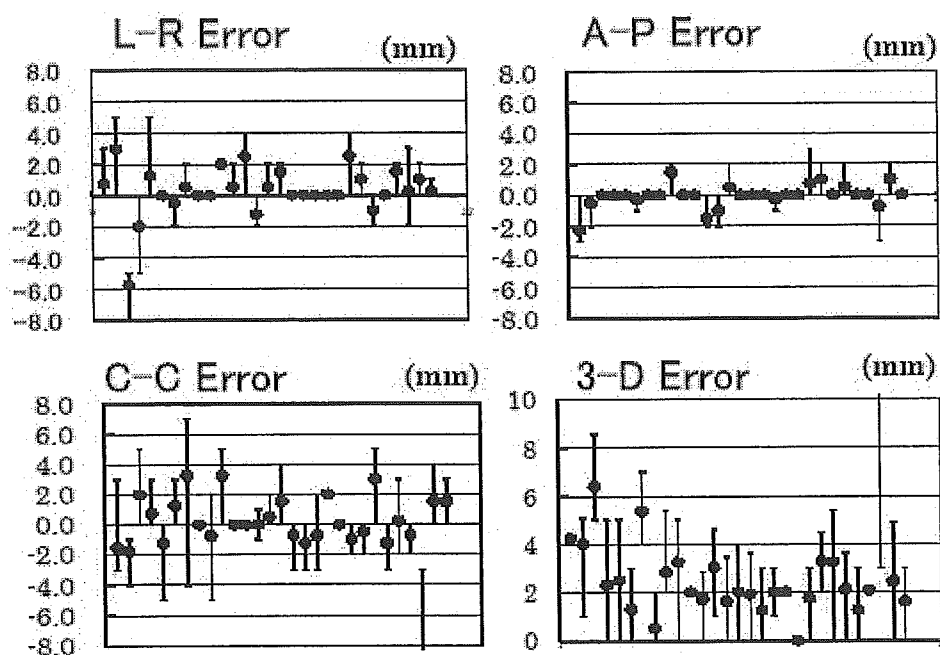


Fig6

	累積比率 (%)			
	< 2mm	< 3mm	< 5mm	≤ 8mm
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

Table1

定位照射における不均質補正法の線量精度評価

肺野部における小照射野条件では側方電子平衡が成立していない場合、線量計算および線量測定精度を評価するのが困難である。補正精度に関する基礎的検討において不均質補

正法は、我々の使用する計画装置においては Generalized Batho 法を用い、照射野 3cm×3cm 以下の照射野は選択しないことにより、計算誤差 5% 以内を確保できた。(Fig7) 不均質補正法の有無により照射線量は平均 6% (1% - 14%) の線量差があることが確認された。

本照射法では固定具による線量の減弱および不均質補正法を考慮する必要がある。^{6,7)}

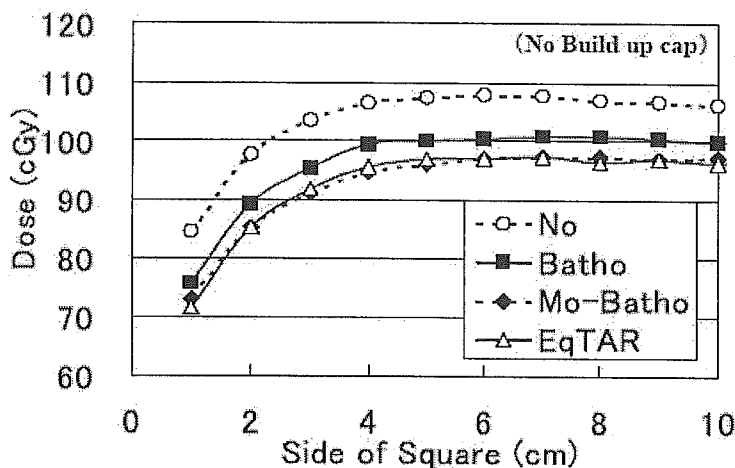


Fig7

体幹部定位放射線治療のまとめ

これまでの検討によって線量精度、位置精度を確立し、安全であり患者にとってやさしい治療法を実施することが可能となった。さらに大掛かりな治療室の改造や新規治療装置の導入なしで、従来の直線加速器と高精度体幹部用固定器具を用い、比較的安価な設備投資で高精度定位照射が可能である。今後は体幹部用固定具に同期照射、治療中のモニタリングを導入し、さらに正常組織のリスクを軽減しより高精度な治療を目指すことが検討されている。本治療法は臨床的にも高い治療効果が期待でき、他診療科との連携により手術にかわる治療法としてますます需要が高まることが期待されるため、さらに効率化を図ることが必要である。

本報告が今後の導入施設において少しでも利用されることを希望する。

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，342，1999.4
- 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雑誌，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) 古賀祐子ほか：体幹部用固定具を用いた定位放射線治療－有効照射角度および線量補正に関する研究－, 日本放射線技術学会雑誌/Vol.57/No.11/1395-1406/2001.11.20
- 6) 矢野慎輔：体幹部定位放射線治療の現状－Stereotactic Body Frame を用いた治療－, 日本放射線技術学会放射線治療分科会誌, Vol.15, No.2, 17-22, 2001.10
- 7) 矢野慎輔：定位照射機器（体幹部用）の精度管理, 日本放射線技術学会放射線治療分科会誌, Vol.17, No.1, 26-34, 2003.4
- 8) 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 of Clinical Radiology, Vol.44, 1617-1623, 1999
- 9) 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
- 10) Ingmar Lax, Ph.D. : Extracranial Stereotactic Radiosurgery of Localized Targets., Journal of Radiosurgery, Vol.1, No.2, 1998

（図表の説明）

Fig 1 : 体幹部定位照射用固定具を用いた放射線照射（上腹部圧迫式呼吸抑制の使用例）

Fig2 : Stereotactic Body Frame の各部名称

① Body frame , ② Chest marker , ③ Leg maker , ④ Level control , ⑤ Diaphragm control , ⑥ Stereotactic arch , ⑦ CT indicators)

Fig 3 : 呼吸移動の抑制（8mm 以上の動きがある場合に抑制効果があれば使用する。図左は患者ごとの病巣移動距離、図右は移動抑制効果を示す）

Fig 4 : 照射可能有効角度（ガントリーと寝台角度の関係）

Fig5 : 標的基準線量への影響（臨床 25 例の減弱補正あり、なしの比較）

Fig6 : SBF による照合精度。Portal Film を用いた Isocenter の位置誤差量の評価（修正する前の 3-D 方向、距離値）

Table1 : Isocenter 位置の再現精度（臨床 27 例）（修正する前の 3-D 方向、距離値）

Fig 7 : 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）

分担課題 定位照射における精度保証技術を中心に
高精度放射線治療の技術評価に関する研究

分担班員 後藤 紳一 長崎大学医学部附属病院 放射線部
精度研究項目 7 : イメージガイド照射技術の特徴と注意点

はじめに

Image guided radiotherapy(IGRT)とは、画像を用いて照射位置の照合をおこなう放射線治療である。このテクニックは、PTV に対してより正確に、かつ再現性よく照射することを目的としている。代表的なものは、2 方向の X 線撮影による方法と CT 画像を使用するものに分かれる。

IGRT の種類と分類

1. 2 方向の X 線を利用したもの

- イ) 2 方向の X 線による射影幾何学的技術を利用したもので座標を算出する方法
- ロ) 2 方向の X 線による射影幾何学的技術を利用したもので画像の輪郭を照合に用いる方法

2. CT 技術を利用したもの

- ハ) 同一寝台の対側に CT を設置したもの
- ニ) コーンビーム CT を利用したもの
- ホ) 高エネルギー Mega Voltage-CT を装備したもの

大きく分けると上記の 5 種類に分類される。

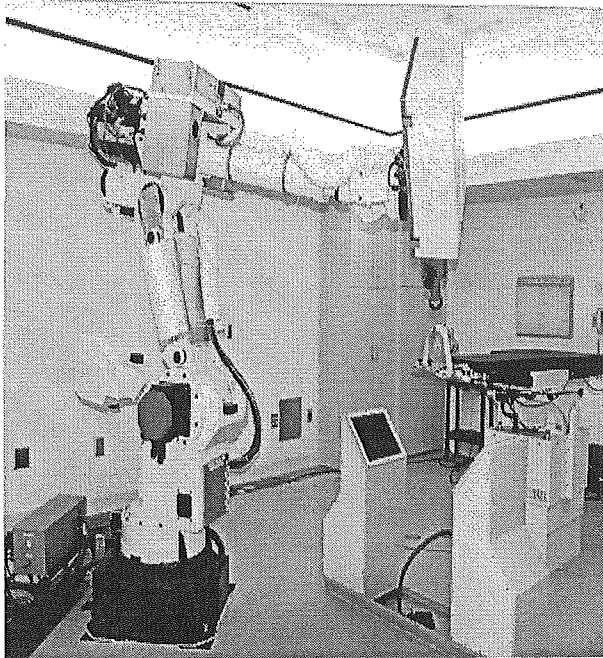


図1. サイバーナイフⅡ

図1は2方向のX線撮影を利用したサイバーナイフⅡである。システム化されており使いやすいが、デジタル画像からの照合であり、PTV に対する照射精度と再現性には疑問が残る。この方式を発展させて動態追尾までを可能とした方法は、real-time radiotherapy(RTRT)といわれる。この技術は白土らにより開発されている。

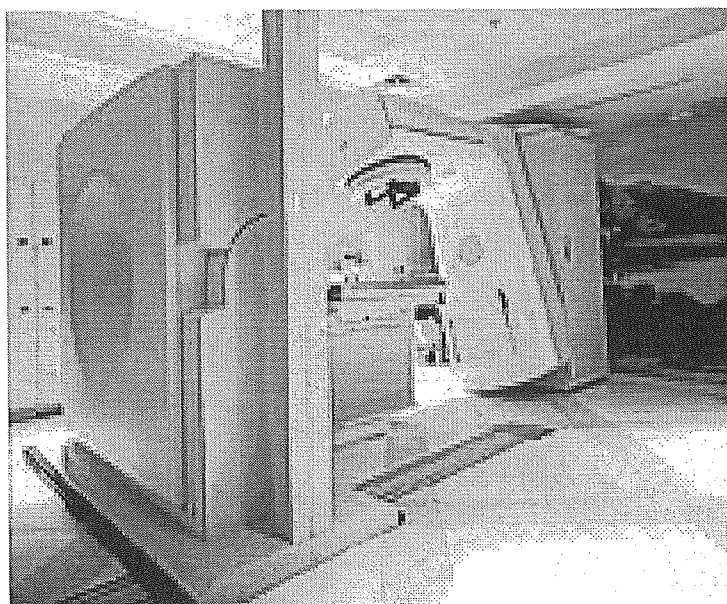


図2. フォーカルユニット

図 2 に示すシステムは、同一寝台をもちいて、治療のガントリーの対側に CT を設置した方法である。植松らによりフォーカルユニットとして広く普及した。CT を用いることにより PTV が解剖学的構造として視覚的に捕らえることが可能となった。ただし、治療のたびに撮像するには時間的な制約を受ける。

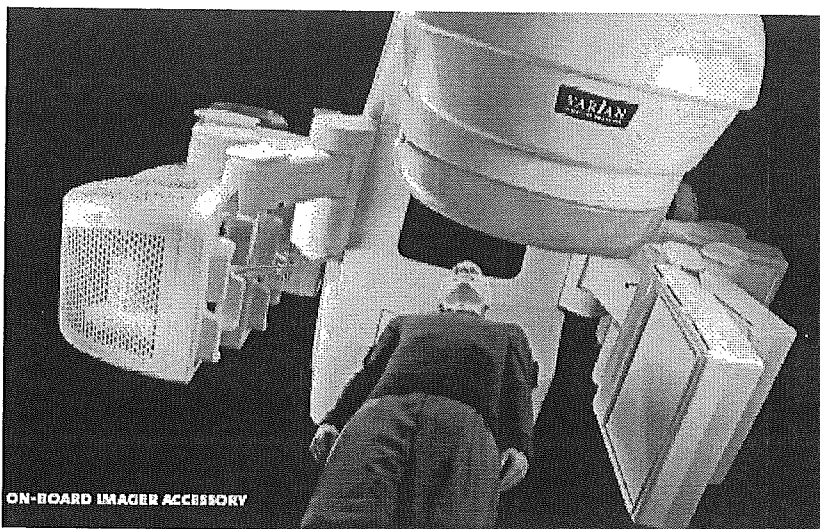


図 3. バリアン社 Torilogy

図 3 に示すシステムは、治療用ライナックのガントリーにコーンビーム CT のユニットを取り付けたものである。同様のシステムとしてはエレクトラ社の Sinagy がある。CT 画像を用いるが欠点も多く、コーンビームの散乱線による画質低下で画像的には満足できない。いまだ発展途上である。また、この CT 画像はハンスフィールドユニット値が精度よく得られないため、現状では治療計画には使えない。画像再構成に時間もかかる。

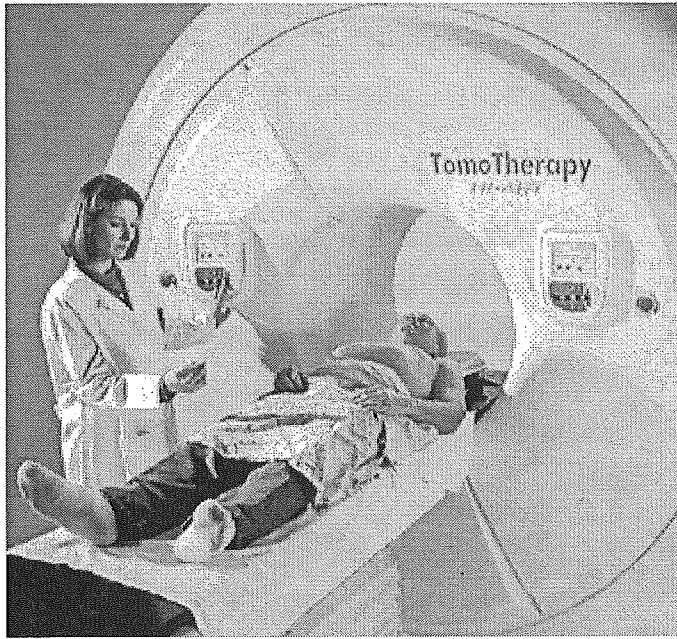


図 4. TomoTherapy Hi-ART system

図 4 は、究極の IGRT 装置といわれている TomoTherapy である。この装置は、これまでの IGRT の欠点をほぼ克服している。治療ビームによる高エネルギー X 線を用いた CT 撮像をおこなうため、治療位置と同一面での照合画像を取得することが可能である。また、スリットビーム技術による精度の高い画像、迅速な画像再構成、システム化された照射位置の照合機能などにより治療ごとのレジストレーションを可能としている。

まとめ

IGRT の本来の目的を考えると、時間的制約などで毎回の治療に使えないものは淘汰されていくであろう。また、位置精度の再現性が確立されていないものも同様である。めまぐるしく進化した IGRT 技術は、CT 画像を用いたフォーカルユニットと TomoTherapy の登場ではじめて臨床効果が期待できるものへと一歩近づいたといえる。技術革新は競争であるため、よりすぐれたシステムが今後登場するであろうが現状のシステムの中での優位性はゆるぎないといえる。欧米で普及し始めているコーンビーム CT の技術革新に期待する。

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
早川和重	管理・治療：放射線療法.	阿部庄作	新しい診断と治療のABC 34「肺癌」	最新医学社	大阪	2005	161-168
早川和重	Ⅲ肺・縦隔：A. 悪性腫瘍の臨床.	田中良明・吉田祥二編	癌・治療効果判定の画像診断	医療科学社	東京	2005	85-94
ウッドハムス玲子, 松永敬二, 原英則, 早川和重	CT, MRIの所見と鑑別診断	加藤治文・西條長宏・福岡正博・小林紘一・海老原善郎・井内康輝・早川和重	MOOK肺癌の臨床2005～2006	篠原出版新社	東京	2006	125-135
石山博條, 早川和重	小細胞肺癌：胸部放射線療法－三次元照射による線量増加と線量分割－.	加藤治文・西條長宏・福岡正博・小林紘一・海老原善郎・井内康輝・早川和重	MOOK肺癌の臨床2005～2006	篠原出版新社	東京	2006	245-249
新部 謙, 早川和重	脳単独転移の進展型小細胞肺癌の治療戦略－oligometastasisの立場から－.	加藤治文・西條長宏・福岡正博・小林紘一・海老原善郎・井内康輝・早川和重	MOOK肺癌の臨床2005～2006	篠原出版新社	東京	2006	251-254
大西洋・平岡真寛	詳細・体幹部定位放射線治療－ガイドラインの詳細と照射マニュアル－	佐野尚樹・佐々木潤一・西尾禎治・白土博樹・永田靖・小久保雅樹・高山賢二・館岡邦彦・矢野慎輔	詳細・体幹部定位放射線治療－ガイドラインの詳細と照射マニュアル－	中外医学社		2006	
唐澤克之 砂村真琴 土井隆一郎	CQ3 放射線療法	日本腫瘍学会 肺癌診療ガイドライン作成小委員会	肺癌診療ガイドライン	金原出版	東京	2006	43-53
岡本雅彦 唐澤克之	非小細胞癌 予防的全脳照射は必要か	加藤治文 西條長宏 福岡正弘他	肺癌の臨床2005-2006	篠原出版新社	東京	2006	417-421