

特徴的なシステムを使用する場合の注意点、精度検証の検討について報告し、研究班としての推奨指針とする。

精度研究項目

肺定位照射における精度向上のためのピットフォール

1. 肺定位照射における呼吸性移動対策 (矢野)
2. 位置あわせの精度および臓器の動きの解析 (藤田)
3. 肺の体幹部定位放射線治療における肺腫瘍の動きの解析 (舘岡)
4. 高精度放射線外部照射における機器的精度管理 (佐々木)
5. CT-Linac システムを用いた位置照合 (山下)
6. 体幹部用固定具を用いた定位照射 (矢野)
7. イメージガイド照射技術の特徴と注意点 (後藤)

C. 研究結果

高精度放射線照射に関する検討として肺定位照射ガイドラインにおいて各班員は執筆を分担しワーキンググループの一端を担った。

D. 研究結論

本分担研究項目は技術的に重要であり班としての指針とする。また、本研究によって今後の導入施設の一助になるものと考えられる。

H. 研究発表 学会発表等

1. 舘岡、他：「放射線線量評価におけるベクトル解析」第 61 回日本放射線技術学会学術大会、2005.4.8
2. 舘岡、他：「体幹部の定位放射線治療の問題点と工夫」第 44 回北日本放射線治療腫瘍学研究会 2005.6.3
3. 舘岡、他：「肺定位放射線治療におけるビーム解析」第 112 回日本医学放射線学会 北日本地方会 2005.6.4
4. 舘岡、他：「放射線治療計画のコツ」第 10 回北奥羽放射線治療懇話会特別講演 2005.9.23
5. 舘岡、他：「肺定位放射線治療におけるビーム方向の解析」第 18 回日本放射線腫瘍学会 2005.11.26
6. 山下幹子、他：「CT リニアックにおける超音波位置照合システムの精度検証」第 61 回日本放射線技術学会総会学術大会 2005.4.8-10
7. 山下幹子、他：「赤外線 CCD カメラを用いた定位放射線照射における問題点」第 12 回日本高精度放射線外部照射研究会 2005.9.2
8. 山下幹子、他：「赤外線 CCD カメラを用いた定位放射線照射における問題点」日本放射線腫瘍学会第 18 回学術大会 2005.11.24-26
9. 矢野慎輔、他：「体幹部病巣に対する直線加速器による定位放射線治療」日本放射線技術学会誌、61 巻第 7 号 918-928.2005 (高精度先進技術を駆使した放射線と料への取り組み、第 60 回日本放射線技術学会報告書)

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1：肺定位照射における呼吸性移動対策

目的

肺定位照射における呼吸性移動対策について技術的内容を中心として注意すべき概要と対策について以下に報告する。本内容は肺定位照射ガイドラインと一部重複するが、さらに追加の項目を補足するものである。

報告の内容は研究班の指針であり、今後、肺定位照射を開始する多くの施設に利用されることを目的とする。

1. 呼吸性移動対策の分類

肺定位照射における呼吸性移動の対策は、治療計画から治療までの各ステップあるいは治療システムごとに注意すべき項目が変わることが考えられる。

1-1. ステップによる分類

- ・治療計画画像（CT画像、MR画像、照合用画像）取得時の対策
- ・治療計画における対策
- ・治療実施時の対策

1-2. システムによる分類

- ・通常外部照射装置
- ・CTリニアック共有寝台システム、
- ・Image Guided Radiation Therapy (IGRT)システム、
- ・体内マーカーを用いた待ち受け（迎撃）（追尾）照射システム等

が挙げられる。上記のステップおよびシステムごとに検討項目は異なる。治療計画画像取得に関しては、使用できるシステムの能力によっても対策が異なってくる。例として、コンベンショナルスキャンを用いるか、ヘリカルスキャン、MDCT、ダイナミックスキャン、Slow Scan、Fast Scanが使えるかによって、得られる画像のもつ意味が異なったものとなる。それに応じて計画時にCTVに対して設定するInternal margin (Inter-fractional organ motion :治療期間中を通しての変動およびIntra-fractional organ motion:治療中の動きを考慮に対するマージン)や、Setup marginは異なってくることを認識する必要がある。また使用するシステムが同じであったとしても、施設ごとの手技や精度レベルによって設定すべきマージンの大きさは異なる。基本的に各施設システムの誤差精度を解析し、各誤差の自乗和の平方根から適正な総合誤差を求めることとなる。

2. 呼吸状態の設定方法による分類

2-1. 呼吸状態の違いによる分類

自由呼吸下照射法、浅呼吸下照射法、呼吸停止下照射法

2-2. 呼吸位相の違いによる分類

自由呼吸下全時間照射法、自由呼吸下追尾照射法、自由呼吸下同期照射法、任意呼吸位相呼吸停止法、呼気相停止下照射法、吸気相停止下照射法

2-3. 呼吸停止方法による分類

強制呼吸停止法、患者自己判断呼吸停止法

これらの呼吸状態設定方法は治療計画から治療実施まで一連で考慮し、治療計画画像の取得、計画時の臓器の体積の扱い等にも注意する必要がある。

また呼吸性移動の捉え方によって分類する場合は、Slow Scan (Long Scan Time)法、同期照射法、待ち受け（迎撃）（追尾）照射システム追随照射法が考えられる。

呼吸位相を観察した場合、時間軸に対し肺活量あるいは位置の上下動が観察できる。これらの呼吸位相カーブは、個人個人で振幅、回数、形状に差が見られる。また人によってはランダムな呼吸サイクルや突発的な深呼吸が見られる。治療前にはこれらの位相は出来る限り小さくしかも一定で規則正しいサイクルになるように被験者に心掛けて頂く事が望ましい。そのため事前に練習を行ったり、メトロノームを利用したり酸素吸入を利用することで、規則性を整える必要がある。呼吸法は複式あるいは胸式呼吸法によって振幅タイミングが逆転する場合がある。これは肺活量観察（スパイロメータ）か、レーザによる胸腹壁観察かによって振幅が異なるので注意が必要である。一般的に呼吸サイクルは、呼気時の停滞時間がもっとも長い傾向がある。したがって、呼気時に同期させたり、呼吸停止させて治療する事が望ましい。強制的に停止させる場合に、音声同期や患者が能動的に停止する方法は、一定サイクルあるいは肺活量で停止するのは通常困難である。この場合も毎回の位置を再現しやすいのは呼気層であると考えられる。もちろん個人によって、差が見られるためベストな状態を把握して検査治療に望むことが必要である。

3. 様々な呼吸同期の方法と注意点

治療計画時の画像取得時における同期の方法として、被験者が自発的（能動的）に同期する方法、他動的に呼吸を制御する方法、二次的な検出装置を用いた同期法がある。以下に各方法の注意点について解説する。

被験者が自発的（能動的）に同期する方法

3-1. 音声同期呼吸停止下撮影法（吸気あるいは呼気）

本方法では同期しているかどうかは患者任せとなる。毎回同一位相で停止が行われているかが不明である。したがって、あらかじめ重要性について説明し練習が必要である。治療時にも同様の使用が出来るが、位置誤差を含む可能性があるためマージンを考慮する必要がある。検査・治療前の食事量によって停止すべき呼吸位相位置が変わる可能性があるため一定になるように時間配分することが必要である。定期的に音声は患者に聞こえているか十分気をつけることが必要である。

3-2. 呼吸波形あるいはシグナル認識による視覚的同期撮影法（吸気あるいは呼気）

音声同期と同様に同期しているかどうかは患者任せとなる。毎回同一位相で停止が行われているかが不明である。重要性について説明し練習が必要である。治療時にも同様の使用が出来るが、位置誤差を含む可能性があるためマージンを考慮する必要がある。検査・治療前の食事量によって停止すべき呼吸位相位置が変わる可能性があるため一定になるように時間配分することが必要である。

他動的に呼吸を制御する方法

3-3. 一定肺活量で呼吸弁を一時的に閉鎖し、その間に撮影する方法

患者に苦痛が伴わないか十分注意し、直ぐに解除できるような安全システムを必ず設置することが必要である。定位置で停止するため照射位置精度はかなり高いと思われる。

二次的な検出装置を用いた同期法

3-4. 赤外線レーザーによる歪量・距離を呼吸位相と関係付けたうえで同期撮影を行う方法

赤外線レーザーと胸腹壁の振幅周期は、腫瘍位置によっては呼吸位相と必ずしも揃うとは限らないため、位相シフト等を考慮して使用する必要がある。また、力の入り具合で徐々に位相曲線の基準点がシフトしてくる可能性がある。そのため十分なりラックス状態で使用しシフトが起きた場合、カットオフレベルへの影響を考慮することが必要である。

3-5. 胸壁マーカーを用いた歪量を呼吸位相と関係付けたうえで同期撮影を行う方法

赤外線レーザーと胸腹壁の振幅周期は、腫瘍位置によっては呼吸位相と必ずしも揃うとは限らないため、位相シフト等を考慮して使用する必要がある。マーカーの設定位置によっては呼吸位相が把握しきれない場合もあるため、設定位置に十分気をつける必要がある。

3-6. 肺活量計（スパイロメータ）を呼吸位相と関係付けたうえで同期撮影を行う方法

スパイロメータと呼吸移動の相関はかなりよく、もっとも推奨できる装置である。腫瘍位置によっては動きの方向、軌道が異なるため注意が必要である。

3-7. 腹圧計によって得られた信号を呼吸位相と関係付けたうえで同期撮影を行う方法

胸式呼吸の場合と複式呼吸の場合ではデータが大きく異なるため、呼吸位相との関係を十分把握することが必要である。毎回同じ位置で圧力を再現するのが難しい。

3-8. 超音波検出器を用いた信号と呼吸位相と関係付けたうえで同期撮影を行う方法

腫瘍位置による画像への影響が大きく位置分解能が問題となる。ただし肺野内部では画像上適さない。

3-9. 侵襲的に体内マーカーを留置し、透視による位置の制御で同期撮影を行う方法

体内マーカーを留置する場合、回転あるいは歪等の検出のために2個あるいは3個の留置が望まれる。留置場所はあくまでも腫瘍位置を反映するものでなくてはならない（周辺部）。ただし、ビーム軸に直接進入する箇所への留置は避けるべきである。留置後にマーカーの本来の設置位置から脱落する場合があります、注意が必要である。3点以上留置すると回転の大きさ傾き等を検出することができる。マーカーを検出する場合マーカーまでの距離と方向により移動量を十分に検出できない場合があるため、3次元的な解析を行う必要がある。マーカーの位置にあわせて照射を行う場合、腫瘍容積を捉えることは出来るが、骨格系との位置関係が大きくずれた場合には、治療計画情報と異なった線量分布になる可能性があるため、注意が必要である。

二次的な検出装置を用いる場合は通常、自由呼吸下で同期撮影が行われる。同期のゲート信号により自動でスキャンする場合とマニュアルで操作者が撮影

ON、OFFを行う場合があるが、人為的誤差を含むため、同期撮影は自動で制御されることを推奨する。スキャン方法はコンベンショナルSCAN、ヘリカルスキャン、マルチスキャン、シネスキャンのいずれかであるが、ダイナミックスキャンを用いる場合は近年急速に普及してきており、画像データの誤差量を十分検討する必要がある。いずれの方法も完成された方法とは言えず、条件によっては解析誤差を大きく含む可能性があることを念頭に置く必要がある。

画像診断機器を用いて呼吸トラッキングを行う場合、ディテクタの観察方向を装置の移動方向と一致する場合、しない場合によって検出誤差が変化するため最適化を図ることが必要である。

被験者が自発的（能動的）に同期する方法は同期が患者任せとなってしまう、他動的に呼吸を制御する方法は患者に苦痛が伴わないか十分注意が必要で直ぐに解除できるような安全システムの設置は必須であること、二次的な検出装置を用いた同期法ではそれぞれの装置に依存した制御設定値と同期の関連性を十分に理解する必要がある。

4. 呼吸移動量の抑制方法

抑制方法としては、上腹部圧迫法、酸素吸入、メトロノームによる規則性学習などがある。以下に注意点を解説する。

対象とする腫瘍の位置がどの領域に存在するかによって、移動量は大きく異なる。一般的に上肺野は移動量が少なく、下肺野ほど移動量が多い。これらの移動量は三次元的に移動量が評価されるべきである。腫瘍の存在位置により、直線移動、ヒステリシス曲線、ループ運動、前後に移動することが報告(Ref.*1)されている。移動量の抑制を行う方法としては、上腹部圧迫法が知られている。上腹部を一定圧で圧迫することにより強制的に移動量を抑制する方法である。これには圧迫量を定量的に調節できる専用圧迫器具や一定量の砂のう袋等を利用することができる。抑制効果があるかどうかの判定は、あらかじめ使用前に3次元的に移動量がどのくらいあるのかを把握した上で、抑制効果があることを評価することが重要である。不必要に使用することは、かえって移動量を大きくする場合も起こりうる。8mm以上の移動量がある場合に上腹部圧迫法を使用して平均5mm以上の抑制効果があるという報告(Ref.*2)がある。

呼吸動が大きい場合に酸素吸入により移動量を減少することが出来る場合がある。この場合上記、上腹部圧迫照射法との組み合わせで効果が上がる場合がある。また、酸素吸入により呼吸の振幅は減少し、呼吸回数は減少することが報告(Ref.*3)されている。

参考文献

- 1) Y.Seppenwoolde, H.Shirato, K.Kitamura et al.,Precise and real-time

measurement of 3D tumor motion in lung due to breathing and heartbeat, measured during radiotherapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 53(4), 822-834, (2002)

- 2) Y.Negoro, Y.Nagata, T.Aoki et al., The effectiveness of an immobilization device in conformal radiotherapy for lung tumor: Reduction of respiratory tumor movement and evaluation of the daily setup accuracy. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 50(4), 889-898, (2001)
- 3) Uematsu, Bouei Med. Univ.

5. Slow Scan (Long Scan Time)法について

Slow Scan (Long Scan Time)法とはCT撮影時に呼吸性移動を伴う場合に、コンベンショナルスキャンを用い、1スライス当り4秒から8秒（数回のスキャン像の重ねあわせ）により病巣の軌跡を平均的な一塊の容積として捉え、治療計画および治療を行う方法である。以下に具体的方法と注意点を述べる。

CT撮影時に呼吸性移動のサイクルに対して、1スライスあたりのスキャン時間が短かった場合に、瞬時の腫瘍位置を捉えることは出来るが、呼吸性移動により次の瞬間には別の位置に移動している可能性がある。通常、健常人の呼吸サイクルは、3、4秒程度とされている。そこで、1スライスのスキャン時間を、定位置で呼吸性移動のサイクルに対して十分に長い時間かけることにより全ての呼吸位相を1スライス上に加算した画像を得ることが出来る。したがって、得られたCT画像は呼吸性移動に伴い、腫瘍位置の移動軌跡の平均的な画像（ITV）となる。この方法は基本的にコンベンショナルスキャンを用いて行われる方法であるが、厳密には病巣位置とCTスキャン中のビーム方向およびディテクターの配置によって得られる形状は変化する。この方法の注意点として、本来の腫瘍サイズおよび形状が異なった状態で描出されることと、呼吸性サイクルにおける最大呼気時と吸気時のスキャン位置である腫瘍のTOP位置とBOTTOM位置では、条件（管球ディテクタ位置）によっては再構成画像上、投影データ像に矛盾が生じ、CT値が低くなったり、高くなったりし、呼吸性移動を含んだ真の腫瘍サイズを見落とす可能性がある。また、瞬間に移動した画像の加算のため、全体的にCT値が低くなっている可能性がある。TOP位置とBOTTOM位置の腫瘍サイズ見落としの対策として、透視、エコー等を用いあらかじめ同部位の三次元的な最大移動量を計測し、Slow Scan法で得られた最大移動量と比較し不足があれば腫瘍サイズの追加をすることで見落としを暫定的に防ぐことができる。（Ref.*1）これらの描出はCT機種、スライス幅・厚、スキャン速度によって変化することが考えられるため各施設において十分な検討が必要である。なおこの方法は当然のことながらHERICALスキャンでは効力を発揮しない。

スキャン条件によって、どのような形状変化、線量分布への影響があるのか未だ十分解析されていないため今後の研究課題である。

参考文献：1) RedJ2004, Helen, MGH

6. 動体追跡（追隨）照射と同期照射の相違点

動体追跡照射は、待ち伏せ照射＝迎撃照射、追っかけ照射＝追隨照射に分けられます。同期照射は呼吸運動において特定の腫瘍位置に合わせるために、呼吸位相や腫瘍位置などを信号化し、照射装置にその同期信号を送って特定のタイミングのみに間歇的な照射する放射線治療全般を指します。迎撃照射は同期照射の一つです。以下に特徴を解説する。

動体追跡放射線治療は、移動する物体の座標を自動認識する動体追跡技術を、照射中に腫瘍位置を把握するために用いた放射線治療全般を指します。そのうち、治療ビームを固定し、予想部位に腫瘍が存在する場合のみ待ち伏せて照射する「迎撃照射」が実用化されています。迎撃照射法は、呼吸位相の代わりに腫瘍近傍に埋入した金属マーカを用いた一種の同期照射です。その他、治療ビーム自体を移動させ、その腫瘍を追いかけながら照射する「追尾照射」が提案されており、これも動体追跡照射の一法です。一方、同期照射は、何らかの同期信号に応じてあるタイミングにあわせて照射を行う方法で、一般には呼吸位相をトリガーにして同期しますが、金属マーカを用いると迎撃照射になります。呼吸位相中の照射時間の観点から分類すると、同期照射（迎撃照射を含む）は呼吸の一部分しか照射しないため全照射時間が長くなります。照射時間が長くなると、患者の苦痛・治療中の体動を来す可能性があるという欠点があります。トリガーとなる信号は、二次的な観察装置を利用したり、能動的に同期させる方法がある。

追隨照射は装置側が、移動することが必要となり、追隨に伴う時間分解能と形状変化への対応が重要なポイントとなります。現在、市販されている追隨照射が可能な装置はないのが現状です。多軸アーム自動制御型加速器であるサイバーナイフやマルチリーフによる追隨照射等が今後有力な装置と考えられます。この方法は、追隨しながら常時照射を行うため、照射時間が早い点が長所です。短所は、急激な動きや、レスポンス時間（信号の往復時間）およびサンプリング時間が長くなるほど位置精度、線量精度に大きく影響し、また、ターゲットの追跡に伴い常時線量分布が変化する可能性があるため線量分布への影響・座標系の捉え方が今後の課題です。

7. 治療計画における呼吸性移動のマージンの取り方

治療計画で使用される計画用画像は、出来る限り高時間分解能の CT 画像を用

い、CTV に対して設定する Internal fraction における organ motion (治療期間中を通しての変動)、Intra fraction における organ motion (治療中の動きを考慮) に対する Internal margin と、Setup margin を複合的に設定することが必要になる。以下に設定における注意点を解説する。

呼吸性移動がある場合、CTV に対して方向ごとに移動成分のマージンをつける必要がある。同期照射の場合、位相期間のどの位相期間を使うのかによって、CT 撮影中の動きの幅が変化するため、マージンの大きさを調整する必要がある。また、同期照射であるからマージンは必要がないといった間違いの無い様にする。

Internal organ motion および Intra organ motion に対するマージンと Setup margin 同士を足し合わせる場合には、単純に加算するのではなく、自乗和の加算の平方根による計算法を用いることが必要となる。

Internal organ motion を出来る限り小さくなるようにセットアップを調整し、治療計画時の患者情報を最大限収集し、治療中に organ motion の変位ができる限り一定になるように状態を保つ。Internal organ motion が一定であればその大きさによってターゲットがフィールドから逸脱しないように margin を考慮する。この際ランダムな乱れがある場合にはその触れ幅を考慮した margin を設定する必要がある。

追跡照射等の4次元照射を取り入れる場合には、マージンを決める元の画像が特に重要であり、16列以上の高時間分解能のCT画像を用いることを推奨する。また、画像上の動きを補償するために複数のディテクターで位置制御を行うことが望ましい。

基本的に患者個別に対象部位の動きがどの程度あるのかを計測することにより評価する。また呼吸の乱れ等を考慮して計測した値に数mmのマージンを追加することが一般的である。Slow Scan法の場合は特に頭尾 (CC) 方向の画像読み取り誤差を注意する必要がある。

呼吸性移動のマージンの取り方は使用するCTシステム、方法により様々であり、得られる画像のもつ意味が異なる。使用するシステムが同じであったとしても、施設ごとの手技や精度レベルによって設定すべきシステムは異なる。基本的に各施設システムの誤差精度を解析し、各誤差の自乗和の平方根から適正な総合誤差を求める。

8. Inter-fractional な体動に対する注意点

治療計画では、治療計画時から全治療期間中においてのCTVおよび周辺臓器の変動 (体重増減、食事量の不均一摂取による位置変動・経過時間、水分摂取量、腫瘍の縮小増大など) による Inter-fractional な位置変化を捉える必要がある。

これらの変動因子に対してマージンが必要であるが、予測しきれない場合は、過去の治療済み患者データの解析等から情報を得る。以下に設定における注意点について解説する。

可能であれば治療計画を行う当日以前から情報収集に努め治療計画時から全治療期間中において、CTV および周辺臓器の変化を捉える。

具体的に考えられる Inter-fractional なオーガンモーションとしては、体重減少による位置変動、食事量の不均一摂取、食事後の経過時間、水分・点滴の摂取量、照射や化学療法による腫瘍の縮小効果、腫瘍の増大現象、周辺肺組織の繊維化の出現、気胸、バイオプシー等による気胸後の回復による位置変化、急激な運動による位置変化、皮膚表面へのテープ貼り付け等による呼吸への影響、その他生理情報が考えられる。考えられる全ての位置変動について検討することが大切である、どのような位置変動をするか予測しきれない場合は、マージンとして安全側に大きめに考慮するか、過去の治療済み患者等のデータを Retrospective に解析し、得られた位置変化参考情報を利用しマージンを設定する (Ref*1)。食事量の不均一摂取、食事後の経過時間、水分・点滴の摂取量に関しては特に上腹部圧迫法を用いる場合には影響が大きいため、事前に患者に注意を促し、毎回の摂取量を一定にする工夫が必要である。

9. Intra-fractional な体動に対する注意点

Intra-fractional なオーガンモーションを観察するにはCTリニアック共有寝台システムなどがあれば、治療時毎の事前チェックを行うのに有効である。

Intra-fraction におけるオーガンモーションの変位（病巣動き等）を出来る限り小さくかつできる限り一定リズムになるように状態を保つようになるようにセットアップを調整し、治療計画時の患者情報を最大限収集する。Intra-fraction のオーガンモーションが一定であればその大きさに応じてターゲットがフィールドからはみ出さないようにマージンを考慮する。この際ランダムな乱れがある場合にはその触れ幅を考慮したマージンが必要になる。以下に詳細を解説する。

体内における CTV は3次元的に動くため（時間軸を加味すると4次元）治療計画情報として最大限の患者情報を収集し、より正確な CTV の動きを把握する必要がある。計画時の画像情報取得はシステム、スキャンの方法によって注意点が異なる。そのことを考慮してインターナルオーガンモーションを評価する必要がある。インターナルオーガンモーションを観察する際に、まず一定の動きになるようにする配慮が必要である。

注意するポイント

- ・十分な時間をかけて呼吸を安静にさせる（治療時も同様に）

- ・被験者の緊張を緩和させる
- ・リズムが規則正しく整うように指導する（メトロノーム、酸素使用、視覚的リズム調整など）
- ・長時間安静にでき、姿勢の変化をなくするための固定具の工夫（手のしびれ防止、腰痛対策、無理のない固定、首の角度、温度調節など）

例として、CT 寝台に患者をセットアップしてすぐにスキャンデータを取るのではなく、十分な時間を置き、呼吸が安定になっているかを確認する必要がある。確認方法としては、あらかじめ透視を用いてどの程度で一定となるか、あるいは二次的な器具の利用として赤外線レーザ、スパイロメータ等の波形観察によって把握することができる。CT 装置を用いる方法としては病巣中心付近にスキャン位置を設定し、寝台を定位置で thin スライススキャンを数回行い、その画像変化から把握することもできる。

このようにできる限り小さな一定モーションを確保した上で、画像情報を取得する。画像情報は thin スライススキャン（1mm から 3mm）で行い、システムの選択により Slow Scan、Fast Scan を選択する。特に同期を行う場合は Fast Scan が必須となり、自由呼吸下照射を対象とする場合は Slow Scan、Fast Scan を選択する。ただし、Q3 でも延べたように動体をスキャンするために X 線発生装置・検出器の回転位置によっては誤差を含んだ偶像を描出する可能性があるため十分な検討が必要である。対策として、より多くの情報量の加算により情報の平均化を行うことが考えられます。もちろん従来の X 線シミュレーションのように透視のみでは体軸、左右方向の動きのみの確認では正確なインターナルオーガンモーションは把握できない。CTV の存在位置によって直線移動、ヒステリシス曲線、ループ運動、前後に CTV が移動することを認識する必要がある。

インターナルオーガンモーションに対するインターナルマージンの設定における重要ポイントは CTV がフィールドからはみ出さないようにマージンを考慮する。モーションが一定であればその大きさに応じたマージンを選定し、CTV のモーションにランダムな乱れがある場合にはその触れ幅を考慮したマージンとする。確率的に低い突発的な動きは場合によっては必要以上にマージンを広げるよりはマージン設定から除外するという考えもある。これは周辺臓器の防御と CTV の線量不足の可能性を実施施設で十分に検討して決定する必要がある。

体内マーカーを使用した動態追跡の手法は、体内マーカーを追跡することにより分割照射における治療毎の CTV の変位、および治療中の CTV の動き（Intra-fractional なモーション）を観察することが可能であり、より少ないインターナルマージンで計画をたてることが可能である。

呼吸同期システムなどを用いた手法は、治療中の CTV の動きを追跡するため

の手法であり、そのことによりインターナルマージンを少ない治療計画を建てることが可能となる。この場合二次的な検出器具を用いた CTV 動きの検出を行う場合は、検出信号と、CTV 動きに関係を十分確認することが重要である。

通常外部照射装置と専用固定具を用いた方法では、CTV の動きを正確に取得し、かつその動きをなるべく抑制することが肝要である。

参考文献

1) Joep C.Stroom, Ben J.M.Heijmen: Geometrical uncertainties, radiotherapy Planning margins, and the ICRU-62 report. Radiother Oncol 64, 75-83, 2002

10.呼吸位相カーブを用いた動体の解析と注意点

同期照射において呼吸位相を利用する場合、二次的な検出装置（Q4参照、赤外線レーザ、圧センサ等）を用い、得られた呼吸位相カーブの特性を適確に把握し、利用における誤差（ドリフト現象、位相のズレ現象）を最小に抑えた上で、計画時画像取得あるいは照射するタイミングを解析する必要がある。タイミングによって最適な位置誤差、照射時間、線量精度となるように同期を考慮する。以下に主な注意点を解説する。

検出器により呼吸位相カーブの縦軸は気体容積であったり、動きの大きさである場合があるが、ここでは一定に振幅が揃っていることを前提に説明を行う（Fig-1）。同期をする場合、呼気相（Fig-1のBottom Line）あるいは吸気相（Fig-1のTop Line）あるいは中間層等（Fig-1のcenter Line）を利用することができるが、一般的には呼気相の停滞時間が長く安定していることから呼気相（Fig-1のBottom Line）を利用した同期をする場合が多い。この場合、最大呼気時は全呼吸期間の一瞬でしかないため、カットオフレベル（Fig-1のA2-line）を設けてある範囲の呼気相に対して同期をかける。最大呼気時からカットオフレベルまでの振幅大きさ（時間：Trigger Time）は同期を行う上で非常に大きな意味を持つ。この時間が短いほど、一定位置に限定した定位置照射が可能である。ところが現実的には、時間的拘束を考えると莫大な画像取得時間、治療時間が必要となるため幅を持たせることが通常である。この幅を大きくする（Fig-1のA1-line）と、この間の解剖的な位置移動を含んだ画像取得になる。そのためCTVの移動量が生じるためカットオフ幅に応じたインターナルオーガンモーションを考慮したマージン設定が必要となる。

検出器によって信号形態は異なるが、何らかの理由（緊張の緩和、呼吸振幅の変化等）により、呼吸位相の振幅位置（基底値、平均位置）が時間経過とともに変化（Fig-2,3）していく場合がある。この場合、あくまで一定位置でカッ

トオフ値で同期をかける設定をしておく、徐々に基底値からの同期幅が変化（増大、減少）することが生じる。そうすると、時間経過とともに一瞬しか同期がかからなくなったり、かなりの時間幅で同期がかかってしまうことが生じてしまう（Fig-2, 3）。例としてFig-2は時間経過とともにリラックス等により平均線が下方へシフトする場合、Fig-3は時間経過とともに呼吸振幅が減少し、その結果Trigger time T1に対してT2が減少する傾向が見られる。この現象を一般的にドリフト現象と呼び、補正をかけるあるいは修正をかけることが重要である。同期を行う場合は常に波形を観察し計画画像取得および治療に望む必要がある。

また、レーザーを用いた検出器を利用する場合は、病巣位置の移動量・方向と検出信号が全く位相がずれる場合がある。これは、腹式・胸式呼吸の違いや病巣位置の呼吸移動がヒステリシス曲線を描く場合や他の臓器の近くであれば引きつれ現象が生じることが考えられる。したがって、利用する呼吸位相がCTVの動きを反映しているか十分検討し、場合によっては位相シフト補正を行った上で同期をかける必要がある（Fig-4）。

同期を行う上での障害と成り得るのが、心臓の鼓動による位相干渉である。

検出位置等を検討し出来る限り純粋な呼吸位相を利用することが必要である。

Fig.1 呼吸位相と同期の取り方

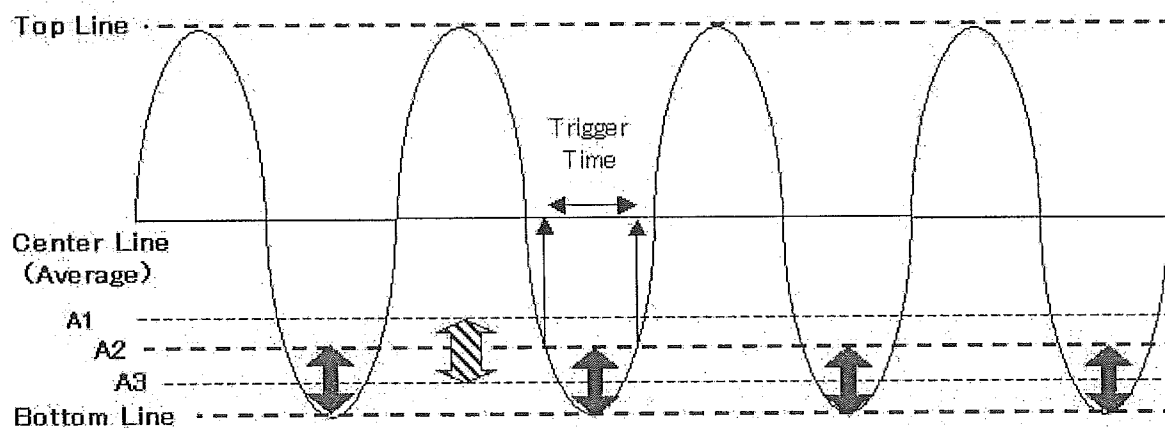


Fig.2 呼吸位相の変化（平均値の変位、Drift-1）

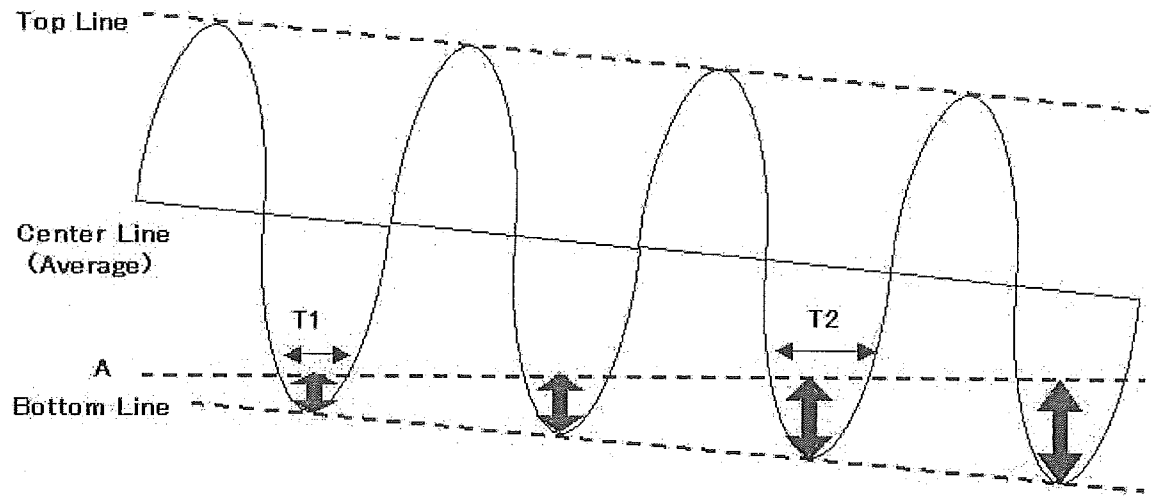
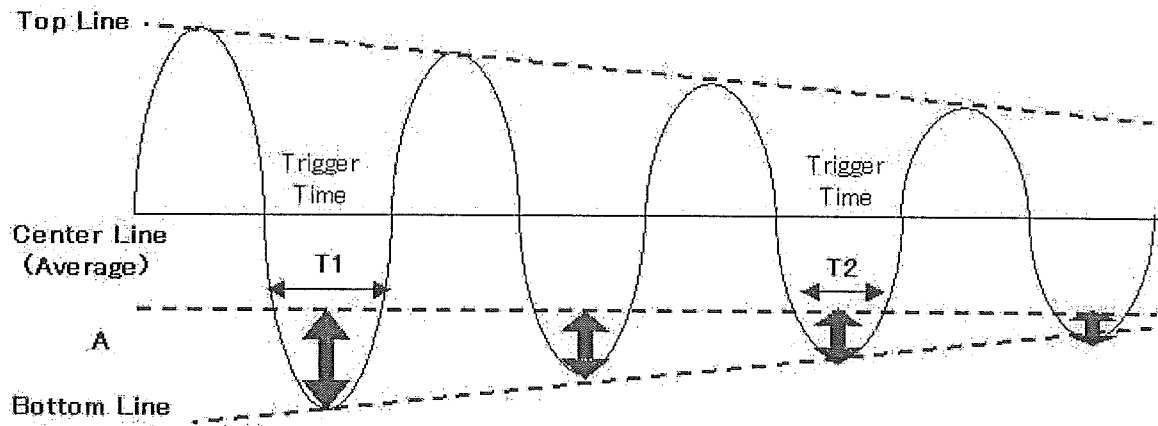


Fig. 3 呼吸位相の変化（振幅幅の変位、Drift-2）



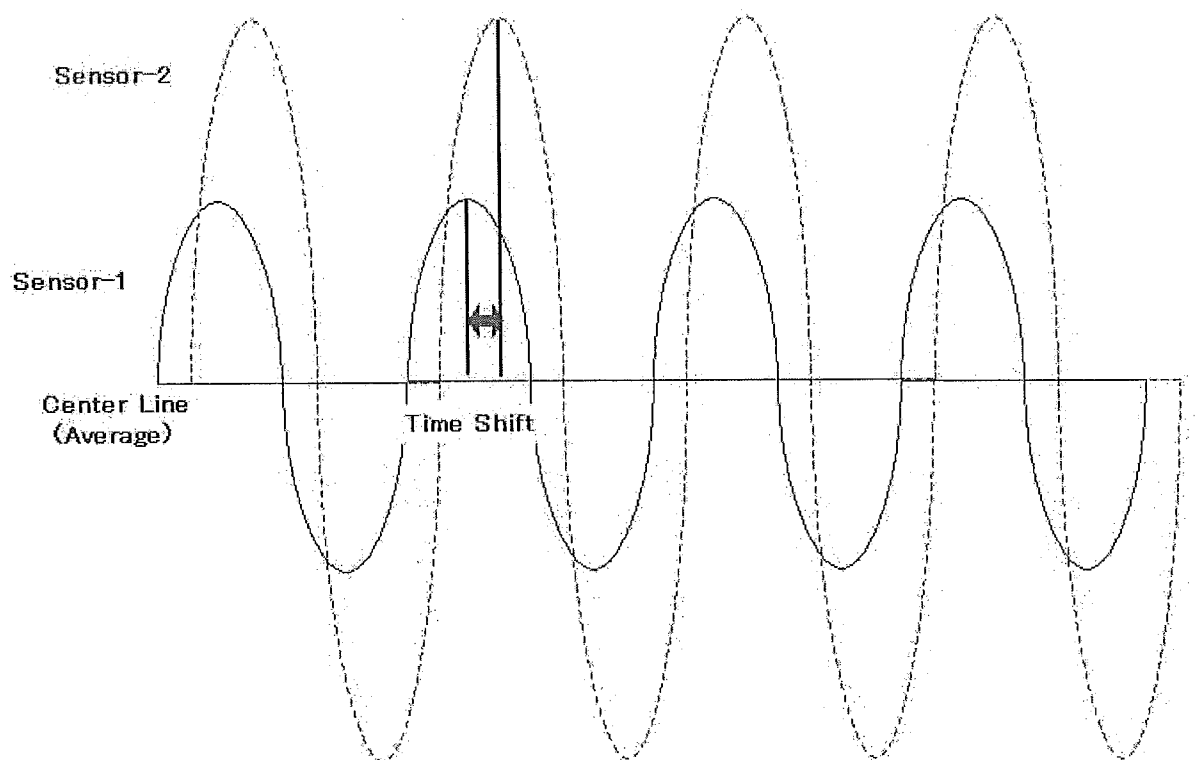


Fig. 4 呼吸位相の変化（振幅位相の時間軸変位、Shift現象）

1 1. 呼吸同期を用いた撮影・照射時の注意点

呼吸同期を用いた治療を行なう場合、治療計画情報取得時に対し治療時照合および治療中に同じ呼吸位相で照射を行うことが必要である。また治療計画では呼吸位相と撮影タイミングの関係を考慮したマージンが必要になる。

呼吸同期を行う場合、一定周期で同じ呼吸位相が繰り返されることが理想的である。したがって、撮影、治療に際しては患者に十分な説明と理解が必要であり、事前にコールドランが必要となる。検査開始あるいはセットアップ直後には患者は力が入る傾向があるため、十分リラックスしたことを確認した上で検査をすすめることが必要である。計画時と同様のタイミングで治療が出来るようにセットアップから照射するまでの時間、手順を同様にするために手順の記録をおこなうことが必要である。治療の照合は当然、治療計画情報取得時に対し同じタイミングで行われるべきであるが、治療中もこれらが同様に持続していることを確認できるようにモニタリング・呼吸制御システムを使用することが望まれる。

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 藤田 勝久 北海道大学病院 放射線部
精度研究項目 2：位置あわせの精度および臓器の動きの解析

1. 位置合わせの精度及び臓器の動きの解析

体幹部に対する放射線治療は、機械的な精度だけでなく動的な要因に対する誤差も把握しなければならない。体幹部治療の精度をあげるためには、患者の固定方法を確立すること、位置合わせの精度及び再現性を定量的に評価すること、治療中の体内での臓器の動きを解析することが必要である。

RTRTシステムは、患者の体内に埋め込まれた金球（2mm、以後マーカ―と記す）を用い2方向からの透視画像から3次元的な患者の位置合わせを行い、治療中のマーカ―の動きを追跡して同期照射を行うものである。Fig. 1にRTRTシステム構成図を示す。位置合わせの精度は、体内にマーカ―を刺入した患者に対し皮膚マークによりセットアップをおこない、次にRTRTシステムでマーカ―による位置合わせをおこなったときのマーカ―実座標と計画座標との距離を算出して評価した。また、臓器の動きは治療中のマーカ―の動きをトラッキングして解析した。

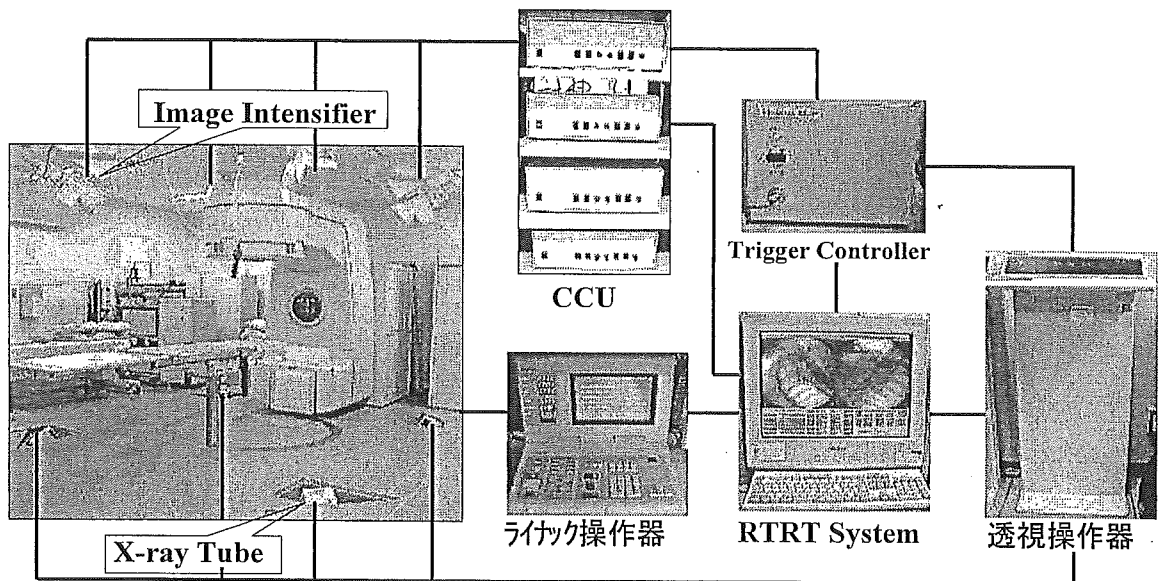


Fig.1 RTRTシステム図

手順は、

- ・経皮、経管的あるいは術中に照射部位の近傍にマーカ―の刺入を行う。
- ・治療計画CTの撮像を行う。CTは高速マルチスライスCTを用い、スライス厚2mmで呼気時に撮影する。
- ・治療計画を行い、治療計画とともにマーカ―の輪郭情報（座標）をRTRTシステムに転送する。
- ・マーカ―の位置情報が表示されたRTRTシステム画面上に、実際の透視画像を投影する。
- ・連続透視画像上に呼気時で照射を行うマーカ―の座標を決め、X,Y,Z軸上のマーカ―の位置を決定する。
- ・治療器に、マーカ―が設定した範囲にきたときに照射を行うゲートをかける。
- ・治療中のマーカ―の動きを30point/secでトラッキングし、この情報を専用ソフトで臓器の動きとして解析する。

1. 1位置合わせの精度

体幹部臓器の位置合わせの精度を表1に示す。

	位置合わせの精度	症例数
前立腺	±3.0mm	45
子宮	±5.0mm	5
脊髄	±1.5mm	3
肺	±2.5mm	38
縦隔	±2.0mm	8
気管	±2.0mm	1
肝臓	±3.0mm	35

表1.体幹部臓器の位置合わせの精度

位置合わせの精度は、皮膚マークでのセットアップ後にマーカーでの位置合わせをおこなったときの寝台の移動距離の平均値で評価した。肺や肝臓のように体内で動く臓器でも同位相期での比較では、2~3mmの精度がでており、前立腺や子宮のような下腹部の位置合わせの方が誤差は大きい。これは皮膚マークをする皮膚の状態が要因になっていると考えられる。脊髄ではシェルとモールドケアで患者専用の固定台を使用した結果、位置合わせで±1.5mmの精度が得られた。

1. 2 臓器の動き

前立腺：治療開始から終了までの間にマーカーによる位置計算で、X軸、Y軸、Z軸方向それぞれの動きを解析した結果をFig. 2に示す。

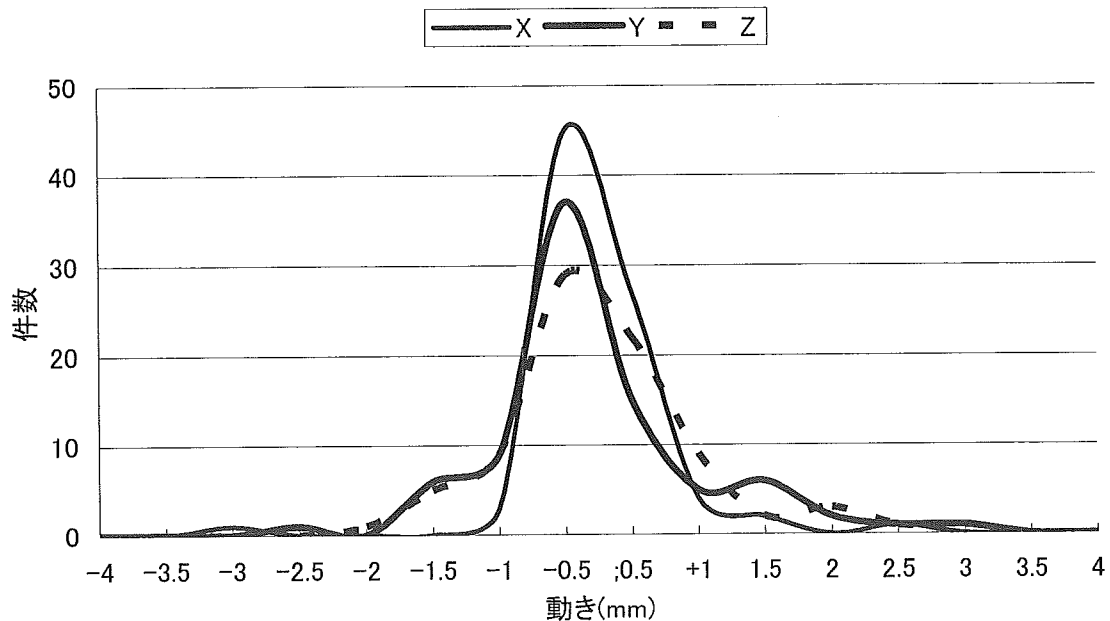


Fig. 2 前立腺における治療中の動き

延べ症例数は83で、実際の治療では2mm以上動いた場合、再位置合わせを行っている。また、3点マーカ一による位置計測から、治療中の体の回転に伴う動きも解析することができる。Fig.3にその1例を示す。

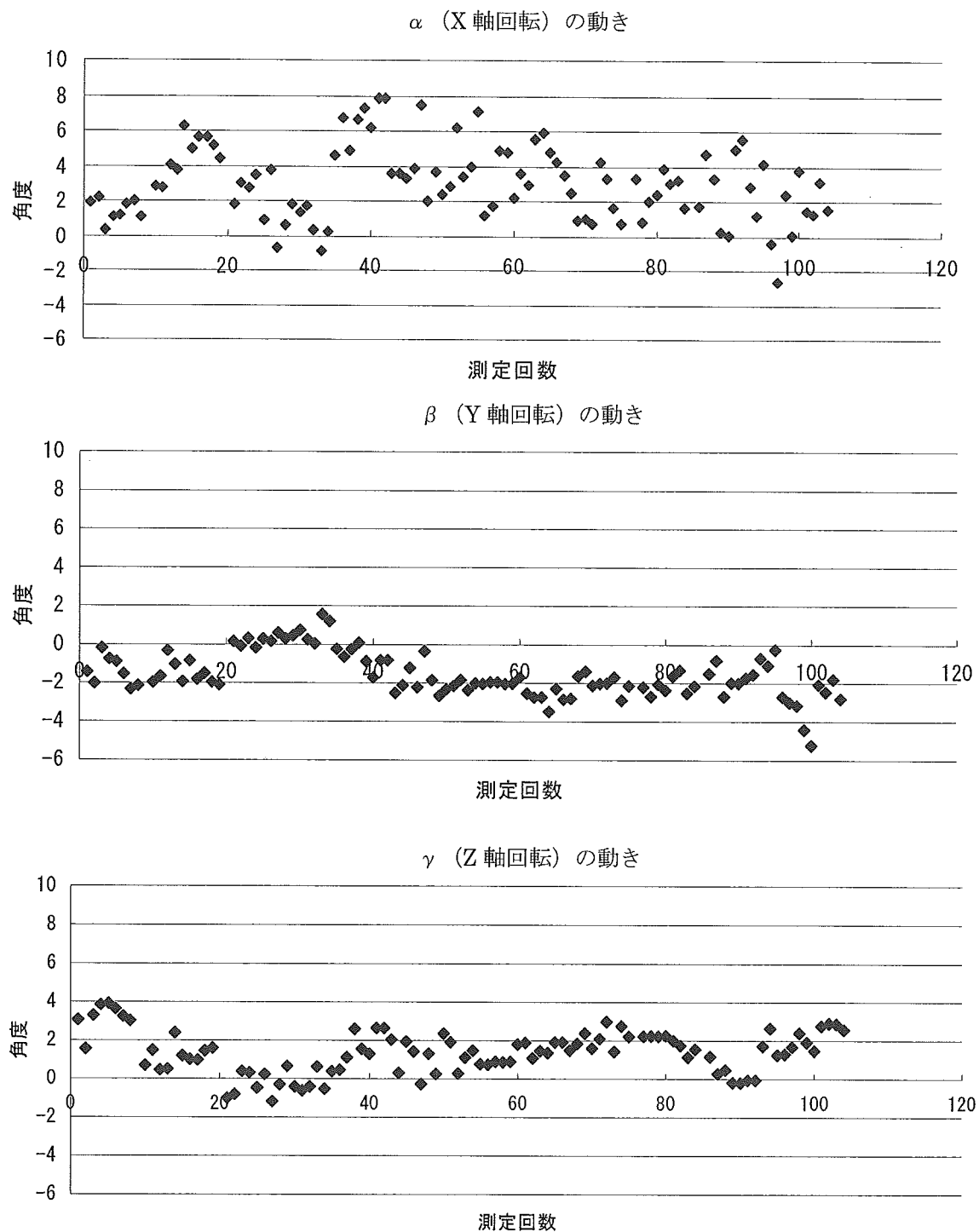


Fig.3 前立腺治療中の体の回転に伴う動き

肺：46例の患者に対し解析を行い、X軸、Y軸、Z軸方向それぞれの動きの幅の頻度を解析した結果をFig.4に示す。

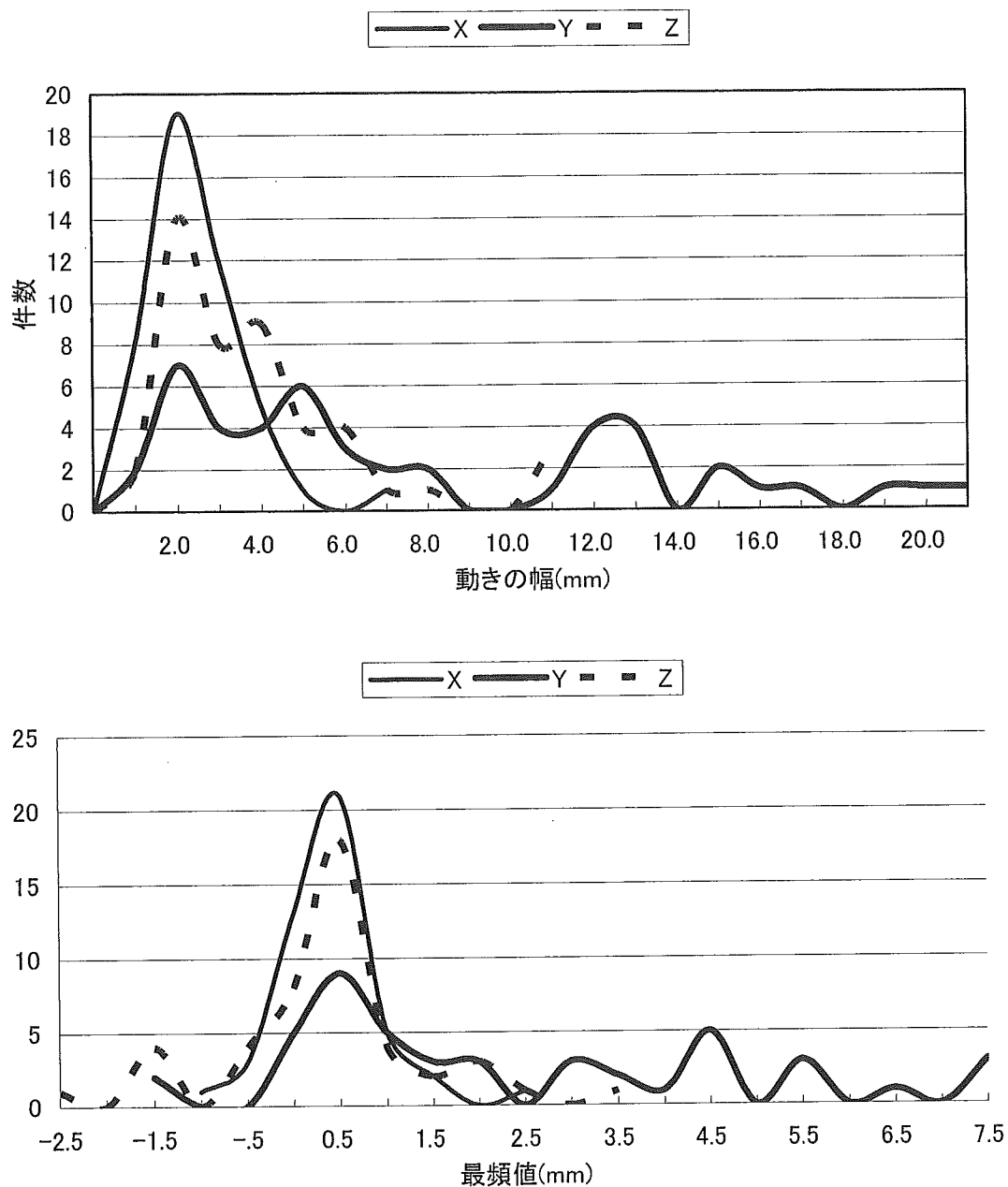


Fig.4 肺の動き

動きの幅はX方向に6mm、Z方向に10mm程度に収まっているが、Y方向には20mmを超えているのがわかる。振幅の中心を0としたときの移動方向の最頻値は、X方向では中心から±1.5mm以内に収束し、Z方向では中心から±2.5mm以内に収束しているが、Y方向では2例を除き全てマイナス方向、つまり呼気時に集中しているのがわかる。

肝臓:肝臓の動きの解析結果をFig. 5に示す。

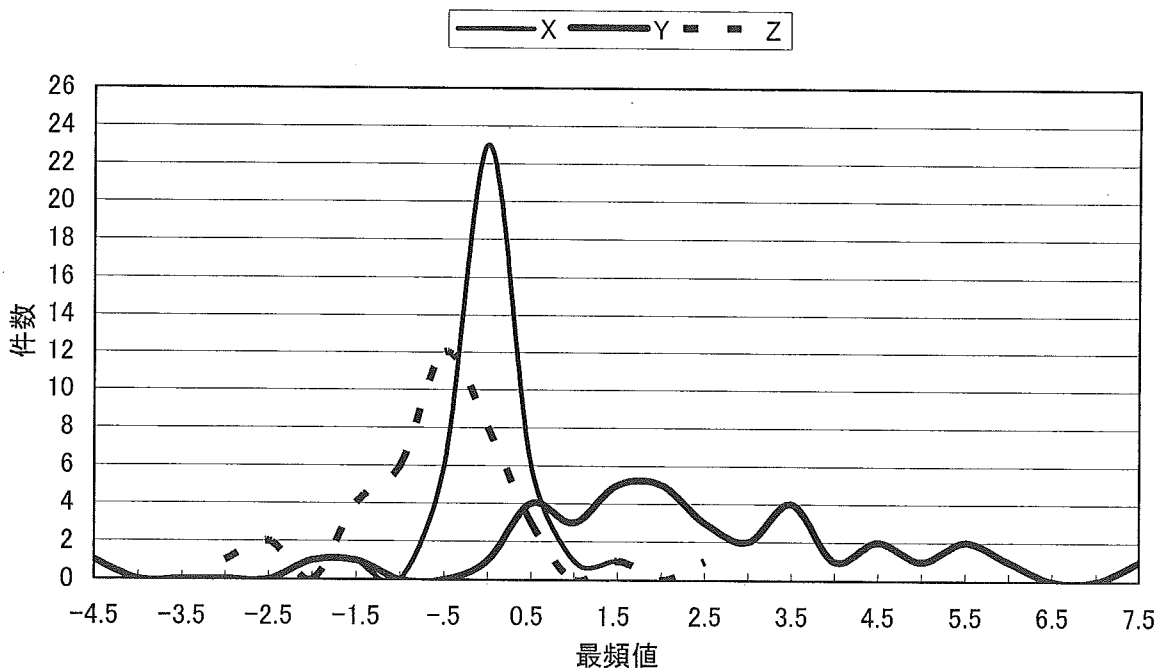
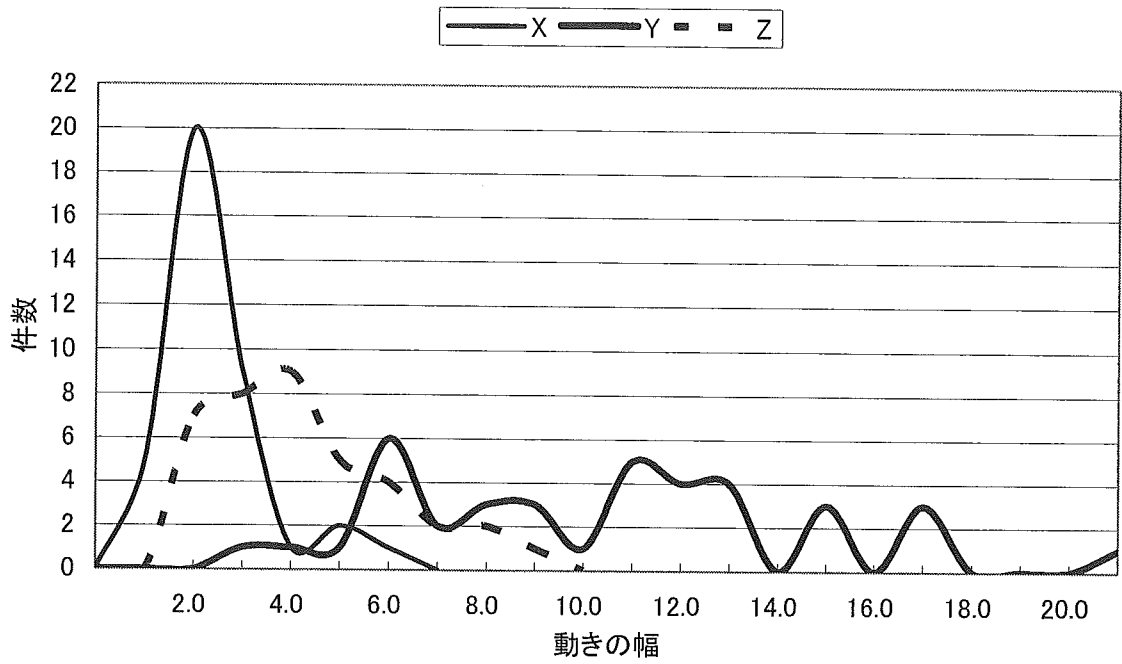


Fig.5 肝臓の動き

横隔膜付近ではY方向の動きが大きく、肺に比べてZ方向の動きが大きいことがわかった。また、患者の緊張感や呼吸方法の変化により時間が経つと最初に位置合わせを行った位置からマーカ―がずれていくこともあり、個々に特異的な動きをする例が多くあった。