

## V. 呼吸性移動対策

### 1. 放射線治療計画における呼吸性移動の意義と注意

International commission of radiation unit and measurements (ICRU) report 62に記述されているPTVとCTVの間のマージンは set-up margin (SM) と internal margin (IM) を加算したものであり (総論・放射線治療計画の項参照), 呼吸性移動は胸部・腹部臓器においてIMの最大の要因となりやすい。しかし, 呼吸性移動はIMの他の要素 (嚥下運動・腸管蠕動・腸管内容量・尿・出血・炎症・胸腹水・筋肉運動・腫瘍の縮小または増大) などと比べて規則性があり, 計測もある程度可能であることから, 放射線治療計画上の対策が注目されている。近年の照射機器の進歩によりSMの縮小については十分な対策が可能となりつつあるが, IMの縮小は一般的には未だ困難な状況である。

また, 呼吸性移動に対するIMの設定は, 患者個別の生理的要素や個々の施設の呼吸性移動対策方法や使用機器などによって異なるので, 各施設・各患者における十分な検証が必要である。

### 2. 呼吸性移動の理解

**移動の時期** : inter-fractional と intra-fractional に分けて考えるが, 他のIMがほとんど inter-fractional成分であるのに対して, 呼吸性移動は intra-fractional 成分のみが問題になる。

**移動の大きさ** : 肺内構造の移動は横隔膜付近で大きく, 肺尖部では小さい。また, 上肺野では頭尾方向の動きは小さいものの前後方向の動きが比較的大きい<sup>1)</sup>。横隔膜付近の呼吸性移動は呼吸の深さや腫瘍の位置にもよるが, 頭尾方向で最も大きく横隔膜直上では最大3～4 cmの場合もある。一般的には自由呼吸下では頭尾・前後・左右のそれぞれの方向に, 5～20mm・8～15mm・5～10mm程度の呼吸性移動があると報告されている<sup>2)</sup>。

**移動の軌跡** : 呼吸による肺容積と肺内位置は一意対応とは限らない (ヒステリシス曲線)。更に, 三次元的な運動経路で分析すると, 肺内の部位によって呼吸性移動は単純な往復運動ではなく, 経路が異なる (ループ曲線) 場合も存在する<sup>3)</sup>。

**呼吸位相の変位** : 長時間の観察では, 緊張緩和や呼吸サイクルの安定下によって, 終末呼気位が観察初期よりも深く (横隔膜位置が低く) なることがあり (図1), 長時間の照射になる場合には呼吸位相の変位が生じる場合があるので十分注意が必要である。

### 3. 呼吸性移動対策の種類と効果

肺癌の治療計画においてIMを縮小する方法としては, 以下の6つが挙げられる。

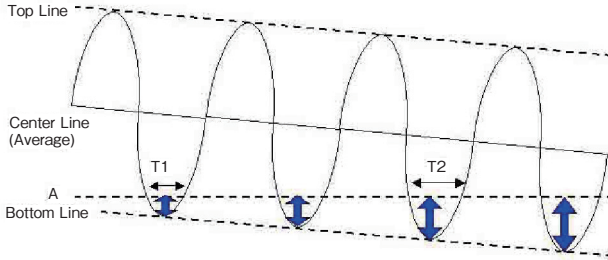


図1. 長時間照射中の呼吸位相レベルの変化の例

### 1) 呼吸性移動自体を縮小する方法

**酸素吸入：**酸素を吸入するだけで呼吸数や換気量を少なくすることがある程度可能である<sup>4)</sup>。

**腹部圧迫：**一般に呼吸は横隔膜運動による腹式呼吸の要素が大きいため、腹部を圧迫することで呼吸運動を縮小することが可能である<sup>5)</sup>。バンドやシェルで固定する方法<sup>6)</sup>、ボディフレームに付属している腹部圧迫板を用いる方法などがある。高価なボディフレームや腹部圧迫板を用いなくても、簡易型のボディシェルで腹部を固定するだけでも呼吸性移動と体動はある程度抑制可能である(図2)。自由呼吸の場合15mm程度の頭尾方向の腫瘍移動距離が、腹部圧迫法によって3～6mm程度に抑制可能である<sup>6)</sup>。ただし、日々の再現性が一定でないこと、胸式呼吸が優位になる分、前後方向の呼吸性移動が大きくなりやすいこと、患者が窮屈感を訴えて固定精度が悪くなってしまうことがあること、などの欠点もある。

**規則性呼吸学習(メトロノーム法)：**呼吸運動の幅を小さくして一定にするために有用だが、その習熟度・再現性が良好とはいえない場合がある。

**呼吸停止法：**自発的または受動的に同一レベルで呼吸を停止する方法である。呼吸位相をモニタリングしながら停止する方法が用いられることが多い。道具を用いない完全な自己判断でも、十分な理解と練習によれば2～3mm以内の呼吸停止位置の再現性は得られるが<sup>3)</sup>、信頼性は低い。換気量測定機器を用いた呼吸停止法について論文化されているものには active breathing control (ABC) system<sup>7)</sup> や deep inspirited breath hold (DIBH) 法<sup>8)</sup>、胸腹2点測定式呼吸モニタを用いた自己呼吸停止法<sup>9)</sup> などがあり、いずれの方法においても2mm前後の inter および intra の呼吸停止位置再現精度が報告されている。呼吸停止位置の再現精度は一般的に終末呼気位相が他の呼吸位相に比べて良好であるが個人差もあり<sup>10)</sup>、X線透視などで確認する必要がある。また、呼気位相は吸気位相に比べて呼吸停止持続時間が短いこと正常肺の照射体積比率は吸気位相の方



図2. 体幹部シェルと吸引型枕を用いた簡易の体幹部固定と呼吸抑制

が有利であることを十分理解した上で、呼吸停止の位相を選択する必要がある。

## 2) 呼吸性移動を照射中に相対的に縮小する方法

**呼吸同期法：**自由呼吸の中で、呼吸位相中の一定の部分のみを照射時間にあてるもので、一般的には呼気終末相を用いる。Underbergらは、自由呼吸下では腫瘍は $8.5 \pm 6.5\text{mm}$ 移動するに対して、呼吸同期法によって $1.4 \pm 0.7\text{mm}$ の移動範囲で照射できたと報告している<sup>11)</sup>。

**動体追跡照射法：**自由呼吸の中で、呼吸位相と腫瘍位置との関係を分析し、呼吸位相に合わせて照射野を移動する(追尾)方法と<sup>12, 13)</sup>、腫瘍の近傍にマーカを埋め込んでこれを透視下に監視し、ある位置を通過する時のみ照射する(迎撃)する方法<sup>14)</sup>の2種類があるが、前者は実用化されていない。動体迎撃法では、照射中の呼吸性移動が頭尾・前後・左右のそれぞれの方向において、平均 $5.4\text{mm} \cdot 2.3\text{mm} \cdot 1.1\text{mm}$ に縮小できると報告されている<sup>15)</sup>。

## 4. 呼吸位相の検出方法

呼吸換気量自体、体壁の上下運動、圧センサ、腹壁周囲長などで呼吸位相を検出する方法があるが、日本で使用できるのは体壁の上下運動を検出測定するものである<sup>9, 16, 17)</sup>。

検出方法や使用機器ごとに検出精度は異なり、また患者毎にも変動量や腫瘍位置との相関は異なるので、各施設・各患者における精度検証が重要である。

## 5. 呼吸移動対策別の治療計画用CT撮像法

まず、治療計画時と治療実施時の呼吸状態を同一にすることが重要である。呼吸性移動や再現性は、あらかじめ治療計画の段階で、2方向での透視や複数回のCTなどで評価する。

治療時に行う呼吸移動対策を、①浅呼吸または抑制呼吸、②自由呼吸で同期または動体追跡をする、③呼吸停止の3法に分けた場合の、それぞれの治療計画用CT撮像法とIMの設定法を表1にまとめる。

表1. 呼吸性移動対策と治療計画用CT撮像法<sup>18)</sup>

呼吸状態	照射方法	照射野決定用CT撮像法	IMの設定方法
浅呼吸 抑制呼吸	全時間	slow scan CT または4D-CT	画像などで評価した呼吸位相の再現精度とCT上の部分体積現象による画像評価時に必要な追加マージンを加える
自由呼吸	同期 迎撃  追尾	設定した条件下でのfast scanまたは4D-CT  4D-C	それぞれの照射方法に対応する照射中心の再現精度を加える
呼吸停止	呼吸停止下	呼吸停止下 fast scan	呼吸停止位置再現精度を加える (数回のCT撮影が望ましい)

### 〈解説〉

自由（浅または抑制）呼吸下・全時間照射法での照射野決定にはslow scan (long time) CT撮像または四次元 (4D) -CTを用いる。一般的に多用されているslow-scan CTは自由呼吸下・全呼吸時間照射法の治療計画に用いるCT撮像法で、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体積として捉え、これをITVとして治療計画および治療を行う方法であるが、以下の理由により最終的なITVを決定するためには更に追加マージンが必要である。

- ①呼吸性移動を平均下して断面に表示しようとするものであるが、画像採取時の呼吸状態の再現性精度に確実性はない。
- ②呼吸サイクルが異なるために、slow-scan CTでは全intra-fraction internal organ motionを確実に平均化して画像収集できるわけではない。
- ③部分体積現象が加わるため、ターゲット辺縁の視覚的評価が曖昧になり、ターゲット

トが小さく見積もられやすい(特に頭尾方向)。

またこの自由(浅または抑制)呼吸下・全時間照射法では、照射野設定用CTと線量計算用CTが異なる点に注意が必要である。

同期照射の場合、位相期間のどの位相期間を使うか、またCT撮影法をどのように設定したかによって、CT撮影に含まれる移動域の範囲が変化するため、internal marginの大きさを調整する必要がある。

呼吸停止法を用いる場合には、1呼吸停止下にて胸部全体を撮像するのが望ましいため、高速CT撮像を必要とする。呼吸停止照射であっても、各呼吸停止位置の再現精度を計測してマージンの大きさを調整する必要がある。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。

また、近年強度変調放射線治療技術が呼吸性移動臓器に用いられている場合があるが、四次元的な治療計画と同条件下の照射が必要であり、これが正確に行われていることを十分に確認する必要がある。

## 6. 参考文献

- 1) Shimizu S, Shirato H, Ogura S, et al. Detection of lung tumor movement in real-time tumor-tracking radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 51: 304-310, 2001.
- 2) Seppenwoolde Y, Shirato H, Kitamura K, 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: 822-834, 2002.
- 3) Onishi H, Kuriyama K, Komiyama T, et al. CT evaluation of patient deep inspiration self-breath-holding: how precisely can patients reproduce the tumor position in the absence of respiratory monitoring devices? *Med Phys* 30: 1183-1187, 2003.
- 4) Uematsu M, Fukui T, Shioda A, et al. A dual computed tomography and linear accelerator unit for stereotactic radiation therapy: a new approach without cranially fixated stereotactic frame. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 35: 587-592, 1996.
- 5) Negoro Y, Nagata Y, Aoki T, 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: 889-898, 2001
- 6) Lee S, Yang DS, Choi MS, et al. Development of respiratory motion reduction device system (RMRDs) for radiotherapy in moving tumors. *Jpn J Clin Oncol* 34: 686-691, 2004.
- 7) Ramouchamps VM, Letts N, Yan D, et al. Three-dimensional evaluation of intra-

- and interfraction immobilization of lung and chest wall using active breathing control: a reproducibility study with breast cancer patients. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 57 : 968-978, 2003.
- 8) Hanley J, Debois MM, Mah D, et al. Deep inspiration breath-hold technique for lung tumors: the potential value of target immobilization and reduced lung density in dose escalation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 45 : 603-611, 1999.
  - 9) Onishi H, Kawakami H, Marino K, et al. A newly developed simple and accurate respiratory indicator relative to measurement of 2-point levels of abdominal and chest walls: for assurance of patient self-judged breath holding techniques for irradiation of lung cancer with small internal margin. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 63 : S534, 2005.
  - 10) Kimura T, Hirokawa Y, Murakami Y, et al. Reproducibility of organ position using voluntary breath-hold method with spirometer for extracranial stereotactic radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 60 : 1307-1313, 2004.
  - 11) Underberg RW, Lagerwaard FJ, Slotman BJ, et al. Benefit of respiration-gated stereotactic radiotherapy for stage I lung cancer: an analysis of 4DCT datasets. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 62 : 554-560, 2005.
  - 12) Keall PJ, Cattell H, Pokhrel D, et al. Geometric accuracy of a real-time target system with dynamic multileaf collimator tracking system. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 65 : 1579-1584, 2006.
  - 13) Kamino Y, Takayama K, Kokubo M, et al. Development of a four-dimensional image-guided radiotherapy system with a gimbaled X-ray head. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 66 : 271-278, 2006.
  - 14) Shirato H, Shimizu S, Shimizu T, et al. Real-time tumor-tracking radiotherapy. *Lancet* 353 : 1331-1332, 1999.
  - 15) Onimaru R, Shirato H, Fujino M, et al. The effect of tumor location and respiratory function on tumor movement estimated by real-time tracking radiotherapy (RTRT) system. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 63 : 164-169, 2005.
  - 16) Ruan D, Fessler JA, Balter JM, et al. Exploring breathing pattern irregularity with projection-based method. *Med Phys* 333 : 2491-2499, 2006.
  - 17) Nakamura K, Shioyama Y, Nomoto S, et al. Reproducibility of the abdominal and chest wall position by voluntary breath-hold technique using a laser-based monitoring and visual feedback system. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 68 : 267-272, 2007.
  - 18) 大西 洋, 平岡真寛: 詳説・体幹部定位放射線治療. 東京, 中外医学社, 2006.