

肺がんや肝臓がんは呼吸に伴い変位するため、その移動体積全体を照射する ITV 法がよく利用されてきた[1]。特定の呼吸位相で息止めを再現することを目的とした呼吸モニタリング装置も国内で開発され[2]、単独あるいは、横隔膜の実時間透視と併用した治療法[3]も提案されている。これらは、いずれも連続的に治療ビームを照射する手法であるが、腫瘍が特定範囲内に位置した時だけに間歇的に照射するゲーティング法も臨床使用されている[4]。

ITV 法では、呼吸抑制用ボディシールドと横隔膜圧迫板を併用し、照射範囲低減に努めることが多い。一方、息止め照射は照射範囲を拡大しないが、息止め反復時の腫瘍位置の再現性評価が重要になる。すなわち、息止め照射は、治療計画時、照射前、照射中の3つの時相で、腫瘍が同じ位置に存在することを前提としているため、この位置のばらつきを評価しない限り、照射マージンを決めることができないはずである。他方、間歇照射であるゲーティング法は、治療時間の増大を伴うため、患者スルーPUTはどうしても下がってしまう。また、治療時間が長いため、照射中の腫瘍位置を確認する必要がある。

呼吸性移動を有する腫瘍を放射線治療する場合に必要な技術は、大きく分けて2つに分類できる。第1は動いている腫瘍の位置を正確に測定する技術であり、第2は位置が特定できた腫瘍に対して、正確にビームを打つ技術である。この両者は、等しく重要である。たとえば、腫瘍位置を正しく計測できていないにもかかわらず、照射マージンを減らしたりしてはいけないことは、すぐ理解できることである。

最近、骨合わせで腫瘍位置決めを行った場合に、横隔膜圧迫した場合としない場合で局所制御率を比較すると、横隔膜圧迫が有意に局所制御率を低下させていたという論文が出版された[5]。これは、横隔膜圧迫により、計画時と治療時の腫瘍と骨の相対的な位置関係がずれたことを示唆している。横隔膜圧迫の目的は、呼吸性移動量を抑制して、ITVの大きさを低減することにより、健常組織の被曝線量を減らすことであつたのだが、皮肉にも同時に照射位置が腫瘍からずれたことになる。これを防止する方法はあるのだろうか？たとえば金などの金属マーカを腫瘍近傍に配置した場合でも、何らかのはずみで、マーカ位置と腫瘍の相対位置がずれる可能性は否定できない。

エレクタ社は、これらの問題を解決する技術を製品化した。肺や肝臓の腫瘍を放射線治療する場合に、治療直前に4D cone beam CT (4D CBCT)を撮像し、その日の腫瘍位置の重心の時間平均座標を計算し、その座標がリニアックのアイソセンタと一致するように、寝台を移動するのである[6]。4D CBCTの撮像時間は3分ないし4分である。この方法の利点は1)マーカや体表変位ではなく、本当に腫瘍を見ていること、2)骨構造に対する日々の腫瘍の位置ずれも補正できることであろう。ワークフローが簡単であるため、治療現場でも良い評価をいただき、臨床稼働中の国内施設は30を超えた。4D CBCTを用いる手法のため、時々刻々の腫瘍位置を監視するのではなく、数分間の平均的な呼吸性移動を画像化しているに過ぎない。幸いなことに、4D CBCTの測定時間は、放射線治療をVMATで実施

する場合に要する時間と同程度のため、照射直前に 4D CBCT で計測した時間平均された呼吸性移動軌跡は、照射中にも時間平均された軌跡として再現すると仮定できるであろう。

最近、横隔膜を圧迫した呼吸抑制下で、治療計画時、照射直前、VMAT SBRT 照射中の 3 つの時相における肺腫瘍の呼吸性移動軌跡の良好な再現性が報告され、この仮定の合理性が実証された[7]。この論文では、VMAT SBRT が採用されたため、照射中の 4D CBCT を撮像できたのである。1 回線量 13.75 Gy を 210 秒程度で照射できる肺 VMAT SBRT では、照射直前と照射中の腫瘍移動軌跡の再現性が高いことが実証されたが、治療時間がもっと長い場合は、検証が必要になると考えている。なお、照射中の 4D CBCT は、分割照射中という意味合いから *intrafraction CBCT* とも呼ばれている。

最新のリニアック装置では、線量率が高い FFF ビームが装備されている。上記の VMAT SBRT を 6 MV FFF ビームで実施すると 90 秒で完了でき、国内では東大で臨床が開始された。肺がんの VMAT SBRT の患者スケジュールを他の治療と同じ 10 分枠としていると聞いている。スループットが高い理由は、4D CBCT で位置決めし、短時間で照射できるためである。照射直後に、その日の治療がうまくいったことを *intrafraction 4D CBCT* の画像で確認できることも、現場で歓迎されている。なお、4D CBCT による被曝線量は、2 cGy 程度である。

1. JASTRO 放射線治療計画ガイドライン 2012, 04 胸部
<http://www.jastro.or.jp/guideline/child.php?eid=00007>
2. 大西、当科開発装置 アブチェス
<http://yamarad.umin.ne.jp/chiryu/abches/>
3. 高仲、「高精度放射線治療における呼吸性移動対策のコツとピットフォール: Abches と Elekta Synergy IGRT 機能を用いた呼吸停止下照射」 Rad Fan, vol. 12, no. 3, 2014
4. 白土、動体追跡放射線治療 http://rad.med.hokudai.ac.jp/rad_research/motion_tracking/
5. Mampuya WA et al, The impact of abdominal compression on outcome in patients treated with stereotactic body radiotherapy for primary lung cancer. J Radiat Res. 55:934-9, 2014 <http://jrr.oxfordjournals.org/content/55/5/934.full.pdf+html>
6. Nakagawa K et al, 4D registration and 4D verification of lung tumor position for stereotactic volumetric modulated arc therapy using respiratory-correlated cone-beam CT, J Radiat Res 54: 152-156, 2013 <http://jrr.oxfordjournals.org/content/54/1/152.full.pdf+html>
7. Nakagawa K et al, Lung tumor motion reproducibility for five patients who received four-fraction VMAT stereotactic ablative body radiotherapy under constrained breathing conditions: a preliminary study. J Radiat Res. 55:1199-201, 2014
<http://jrr.oxfordjournals.org/content/55/6/1199.full.pdf+html>