

高精度治療を支える画像誘導放射線治療の発展

京都第二赤十字病院 放射線治療科

清水 大介

要旨：放射線治療は近年その機器・技術の進歩が目覚ましく、いわゆる“高精度治療”が普及しつつある。その高精度な治療を支えるためには、様々な画像診断を併用して腫瘍の位置を正確に把握する必要がある。治療機器にもその画像診断装置を搭載、あるいは同室に画像診断機器を設置することで、治療時に診断画像を参照のうえ、照射位置の補正を行う“画像誘導放射線治療”が可能になっている。X線透視やCTを搭載した治療機器は現在ほぼ広く普及しつつあり、それらの画像誘導をもとに放射線治療が一般的に行われるようになっていくとともに、その治療による成績改善も報告されている。近年はモダリティの異なるMRIを搭載した治療機器も登場し、限られた施設ではあるが実際にMRI画像誘導を併用した治療が本邦でも開始されており、今後の発展、普及が待たれる。

また小線源治療においても同様に、CT・MRIを併用した画像誘導治療が発展しその有用性が報告されている。小線源治療ではその線源配置も重要であり、子宮頸癌を例にアプリケーション留置の進歩とその際にも併用される画像誘導について解説を加える。

Key words：高精度, CT, MRI, 画像誘導放射線治療, 小線源治療

はじめに

放射線治療は現代の癌治療の一つとして認識され、手術・抗がん剤治療とともに集学的な治療に組み込まれることが多く、その治療成績の向上に寄与している部分は大きい。近年、コンピュータ技術が目覚ましく発展するとともに、放射線治療機器も性能が著しく進歩している。また放射線物理学や生物学の知見も改めて見直され高精度な放射線治療が様々な形式で登場している。その高精度な治療を行うためには、腫瘍の位置を正確に把握することが不可欠となるため、画像診断を組み合わせることで腫瘍に対してより正確に放射線を照射する技術も必然的に発展してきた。治療を行う前だけではなく、治療直前、そして今や治療中にもターゲットとなる腫瘍がはっきり確認できる状態で、照射線量を確実に処方しつつ、その周囲正常組織の照射線量については可能な限り抑える、その技術に関して今回は焦点をあて詳説する。

背景

1895年に人工放射線としてX線がRoentgenにより発見されて以来、1898年にはCurie夫妻によって自然放射線としてラジウムが発見、1934年には人工放射性同位元素が生成され、それ以降放射線画像診断の臨床応用に目覚ましい進歩が始まった。1972年にはCT（Computed Tomography：コンピュータ断層撮影）が開発され、その翌年にはMRI（Magnetic Resonance Imaging：核磁気共鳴画像）開発もなされており、現在では全身のあらゆる部位に対応する詳細な画像診断が可能となり、様々な疾患の治療に寄与している。

一方放射線治療においては、StenbeckによりX線の発見からわずか4年後の1899年には皮膚癌の治療に成功したとされている。またラジウムの表面貼付による治療もDanclos & Curieらによって1901年には行われている^{1,2)}。そして現代においても、高エネルギーX線および放射性同位元素による放射



図1 当院のリニアック
Gantry に直交する形で EPID が搭載・装備され、kV-X 線による透視・コーンビーム CT 撮影が可能

線は、DNA 切断による細胞障害作用により様々ながん治療に応用され、こちらも現代のがん治療にはなくてはならない存在となってきている。様々な腫瘍への効果が確認される一方、抗がん剤同様に正常組織への有害事象も認められるため、腫瘍へ正確に照射する技術が必然的に考慮されることとなった。そこで、先の放射線診断を放射線治療時に組み合わせて行う、いわゆる“画像誘導放射線治療”が放射線治療機器の進歩とともに可能となり、正確な位置照合の上で照射を行うことができる（図1）。

また、人工放射性同位元素による γ 線を用いた小線源治療においても治療時に診断画像を組みあわせて行う“画像誘導小線源治療”（IGBT: Image Guided Brachytherapy）が進歩している。

CT 画像が治療計画そのものに利用され始めてから、病巣あるいはその周囲正常組織の位置把握が精密なものとなり、また、X 線ビームの体内組織による吸収を算出して病巣線量の精度上昇にも寄与している。そして、治療時に取得した CT 画像と治療計画 CT 画像を合わせる画像誘導による位置照合が現在普及し、採用する施設が多いと思われる。近年は CT よりも画像コントラストの点において良好な MRI を用いた画像誘導により、さらに正確な腫瘍への照射と、それに近接する臓器への線量低減を図ることが可能になってきている。また、小線源治療においても同様に CT や MRI を用いた画像誘導治療が日本でも発展しつつある。

画像誘導放射線治療

1. 定義

画像誘導放射線治療は高精度放射線治療のひとつであり、2010 年 4 月に保険収載された。従来と比較して正確に照射が可能になり、広く設定されていた照射野を縮小し、周囲組織への照射量を低減できる利点が生まれる。

2010 年 9 月に日本医学物理学会、日本放射線技術学会、日本放射線腫瘍学会より画像誘導放射線治療臨床導入のためのガイドラインが発表されている³⁾。それによると、IGRT とは“2 方向以上の二次元照合画像、または三次元照合画像に基づき、治療時の患者位置変位量を三次元的に計測、修正し、治療計画で決定した照射位置を可能な限り再現する照合技術”を意味する。診療報酬上は、“IGRT とは毎回の照射時に治療計画時と照射時の照射中心位置の三次元的な空間的再現性が 5 mm 以内であることを照射室内で画像的に確認・記録して照射する治療のことである”とされる。

2. IGRT の機器的要件

“位置照合装置が放射線照射装置と同室に設置されており、その位置照合装置は骨格、基準マーカー、臓器の輪郭を基に患者位置変位量を計測するための照合画像を取得できるシステムであること”さらに、“ソフトウェアなどを用いて基準画像と照合画像を比較し、治療寝台移動量を計測できること”とされている。

照合画像を取得する装置としてはガイドライン上、以下の装置があげられる。

① 2 方向以上の透視が可能な装置

治療室内設置の装置、放射線照射装置に付属の撮影装置

② 画像照合可能な CT 装置

治療室内に設置された CT 装置，放射線照射装置に付属のコーンビーム CT 撮影装置

③ 画像照合可能な超音波診断装置

さらに近年では，MRI 画像を照合画像として用いる機器も登場している⁴⁾。

3. それぞれの照合装置による実際の治療

以下，放射線治療時に取得できる画像により可能な位置照合につき，上記に照らし合わせつつ記載する。

実際に位置ずれが治療成績に影響を与えることは報告されており^{5,6)}，前立腺癌では金属マーカーを使用した IGRT により明らかな治療成績の改善があったとされる。その中では高リスク患者の3年 PSA 無再発率は IGRT 併用有無でそれぞれ 97%，77.7% であり，Grade 2 以上の尿路系有害事象はそれぞれ 10.4%，20.0% であったとされている⁵⁾。

① X 線透視

通常の放射線治療開始時には，位置確認のため治療用 X 線の短時間曝写（リニアックグラフィー）を行い，二次元的に位置照合を行うのが一般的である。近年は，kV-X 線を治療機器に装備し高画質の画像を得ることのできる装置（EPID: electronic portal imaging device）が普及しており，2方向同時撮影にて三次元的に IGRT を行う。おもに体内の骨構造による位置照合が可能となり，骨自体への照射の場合や周囲骨構造が目印になる場合，あるいは X 線透視で確認可能な腫瘍については照合性が比較的高い。ただし，呼吸・腸蠕動・腸管内容・尿量により変化する腫瘍位置照合については困難であるため，その場合は侵襲的な処置となるが，腫瘍近傍に金属マーカーを刺入，留置し，そのマーカーをもとに位置照合を行うことがある。また，2方向からの撮影であるため体のねじれによる位置ずれについては詳細な認識が難しい場合がある。

また治療装置への搭載ではなく，治療室内の床と天井に X 線撮像装置を設置し，その X 線の画像情報を元に患者の位置照合を行うシステムも存在する。本システムの場合，画像照合は治療装置と別に作動するので，照射中にも X 線画像照合が可能であり，あらかじめ設定された誤差閾値を超えた場合は治療を中断することが可能である。

② CT

治療機器に装備された kV もしくは MV-X 線によりコーンビーム CT 撮影が可能となり，骨構造に加え，腫瘍あるいは臓器自体の位置照合を行うことが可能である（図2）。ただし，コントラスト分解能が通常の診断 CT と比較して低いことから，size が大きく広範囲に不整に広がる腫瘍や，腹部，骨盤部などで軟部組織が多く，他臓器との境界が分かりにくい領域では照合性が低い。とはいえ，上記 X



図2 前立腺癌治療時の CT 画像誘導

左：計画 CT 時 中央：治療時コーンビーム CT 右：fusion 画像
前立腺内の石灰化をマーカーとして位置合わせも可能

線透視画像と比較してより正確な 3 次元的位置照合が可能であり、治療の高精度化に伴い強度変調放射線治療や定位照射などで上記の透視画像による照合よりも汎用されてきている。ただし、より被曝量を伴うことに関しては考慮されつつ適用していくべきと思われる。

③ 超音波

ターゲット近傍の体表面上をスキャンして二次元の超音波画像を複数取得し、それらを再構成して得られた 3 次元画像を用いて位置照合を行う^{7,8)}。他に比べて安全・簡便・安価な方法であり、軟部組織でのコントラストは良い反面、超音波画像が取得できる領域でのみ適応可能な方法であること、手技により再現性が低くなる可能性があること、骨やガスによる影響を受けやすいなどの点は考慮しなければならない。経腹式プローベによる方法が従来から行われているが、特に前立腺癌に対する放射線治療では経会陰式プローベを用いた超音波画像誘導放射線治療も行われている⁷⁾。

④ 体表面

SGRT (surface guided radiotherapy) とも言われ、高解像度カメラを使用して患者の皮膚表面をスキャンし、三次元的に 0.5-1 mm 以下の精度で位置合わせを行う方法である。特に乳癌術後照射においては、心臓への照射線量を低減させるために、乳房と心臓との距離を離すことができる深吸気息止めでの照射を行うことがあるが、1 回の放射線治療中に数回の息止めが必要になるため、呼吸ごとの息止め位置の再現性を保つことが難しい。SGRT を用いるとその目標の吸気量の再現性を保つことが可能である。また乳癌術後に限らないが、毎回の照射位置合わせのため従来よりペンで皮膚にマーキングを多数しているが、これを減らせることにより消えないように注意するストレスも減らせるという利点はある⁹⁻¹²⁾。

⑤ MRI

MRI は CT と比較してコントラスト分解能に優れるため、特に軟部組織の多い腹部、骨盤部では正確な位置合わせが可能である。近年、治療時に取得した MRI 画像による位置照合が可能な MRI 放射線治療装置が開発され、日本でも導入される施設が増加している。

MRI が治療システムに導入されている点で従来にはない物理的・技術的な検証そしてその品質保証や管理が必要になること、またこれまで発展してきた全ての高精度治療を基盤に行われる点で治療精度を担保する必要があることから、適切に運用されるためのガイドラインが 2021 年 10 月に作成されている¹³⁾。

MRI による画像誘導の最大の利点は、“(治療中でも) 腫瘍がはっきりと見える” 点にある。MRI 装置の場合も照射中に MRI を撮影することができ、real-time に腫瘍が自動認識される。照射中の腫瘍の動きがある場合、腫瘍周囲に設定した境界を超えると照射が中止される自動制御システムがある¹⁴⁾。また、最近 “Adaptive Radiotherapy (ART)” という言葉も登場してきているが、これは “適応放射線治療” などと訳され、治療期間中の病巣の変化や臓器の位置移動や変形に合わせて最適化し再計画する手法である。

ART はその技術の違いにより、ESTRO physics workshop により細分類されている¹⁵⁾。

- 1) ad-hoc offline replanning : 腫瘍の縮小等に応じて新たに治療計画を立案する
- 2) protocolled offline replanning : 新たな治療計画を立案するタイミングを計画的に決める
- 3) online plan library : IGRT の結果をもとに、事前に用意した複数の治療計画の中から最適な治療計画を選択する
- 4) daily online replanning : 当日の状態に最適な治療計画を照射の直前に都度作成する

現在までも別に診断用に撮影された MRI 画像を計画 CT に fusion させた上で、適宜治療計画を変更

することはあるものの、本機器による最大の特徴としては4)に挙げられるように、患者を治療寝台上でセットアップしたまま、その場で撮影した画像に基づいて輪郭修正、再治療計画、検証までの一連の作業を行い、治療当日の腫瘍・周囲臓器の状態に応じた最適な放射線治療を行うこともできるシステムであり、特に online-ART、即時適合型放射線治療と呼ばれる。

連日の放射線治療で、原発巣の縮小、周囲正常の臓器位置・形状変化に対応する治療計画を立て、照射を行うことができれば理想的であるが、上記機器ではそれが可能となる^{14,16)}。従って、原発巣周囲の照射範囲をさらに減らすことが可能となり、それに伴い原発巣への照射線量を増やせる可能性もある。ただし、治療計画や検証作業を短時間で行う必要があり、そのためのマンパワー、治療時間が準備されていなければ現時点では実現不可能な治療である。

画像誘導小線源治療：我々の試みも含めて

1. 子宮頸癌に対する小線源治療（腔内照射）

上記の画像誘導放射線治療は近年小線源治療においても適用されてきており、子宮頸癌治療を例に我々の試みも含めて以下に紹介する。

子宮頸癌はヒトパピローマウイルスが関連した扁平上皮癌の割合が多く放射線感受性が高いため、放射線治療が早期の段階から治療適応とされる疾患である。放射線治療は予防的な骨盤リンパ節領域を含んだ全骨盤照射と、病変局所への照射を行う小線源治療（腔内照射）を組み合わせで行われる。腔内照射は従来アプリケーション挿入後に X 線透視を用い 2 次元的に治療計画・照射を行っていたが、近年は CT・MRI を用いた 3 次元的な治療計画・照射へと発展してきており、画像誘導小線源治療（Image-Guided Brachytherapy: IGBT）と呼ばれる（図 3）。すでにヨーロッパでは 2000 年代から放射線腫瘍学会の婦人科グループ（GEC-ESTRO）を中心に IGBT が行われてきており^{17,18)}、そのデータが EMBRACE study として重ねられてきている¹⁹⁾。3 次元的に正確に腫瘍の位置・範囲を捉え照射を行うとともに、近接する膀胱や直腸など周囲正常組織の放射線量を低減させることが可能となり、毎回治療を行う直前の CT・MRI 画像を用いて計画・治療を行うので、これも“adaptive radiotherapy”の一つである。

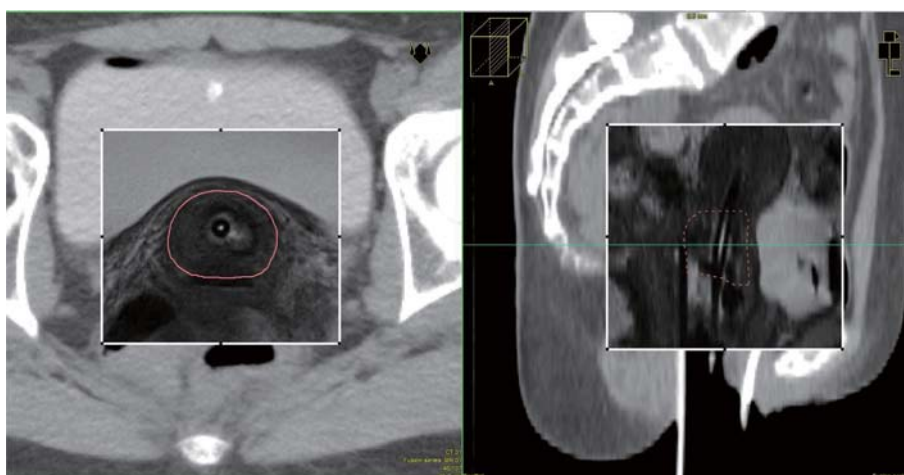


図 3 子宮頸癌 画像誘導小線源治療

治療前 CT に MRI 画像を重ね合わせ病変・子宮頸部で fusion している

左：axial 右：sagittal

京都府立医科大学 放射線科 増井浩二先生よりご提供

2. 子宮頸癌に対する組織内照射併用

しかし、局所進行例（子宮外組織浸潤）や巨大腫瘍などでは局所制御率は不十分であり、そのような通常のアプリケーションのみでは線量投与が十分でない子宮外進展度の高い腫瘍に対しては、組織内照射用アプリケーション刺入を併用した腔内組織内照射（ハイブリッド腔内照射）あるいは通常のアプリケーションは使用せず組織内照射のみを行い、局所制御率を向上させている²⁰⁾（図4）。

子宮頸部は直腸とほぼ接しているため、経直腸超音波（TRUS）の方が経腹エコーに比較して病変や子宮の描出がしやすく、我々は腔内組織内照射のアプリケーション刺入の際には TRUS を用いて行っている。ただ、小線源治療では、線量分布を決定する上でアプリケーションおよび組織内針の配置が重要であるが、組織内針刺入には TRUS を用いて行っているため、直腸プローブ挿入によって腫瘍の画像描出に変形が生じる²¹⁾（図5）。しかし、実際の治療計画作成時の CT・MRI 画像には直腸にプローブが存在しないため、刺入時の想定線量分布と、実際の治療計画で得られる線量分布の間には差異が生じる。また TRUS を用いるため、刺入による技術差が生じ、治療計画の再現性が低下することも問題点である。

そこで、我々は組織内針刺入時に TRUS に CT/MRI を fusion させ刺入を行うことで線量分布認識の相違を少なくすることができれば、より客観性の高い、再現性のある正確かつ迅速な小線源治療が可能になるのではと考えている。

実際に現在までに画像融合システム特に TRUS/MRI fusion を使用した腫瘍の生検、治療は既に国内外で前立腺癌^{22, 23)}、肝細胞癌²⁴⁾などにおいて施行、報告されている。前立腺癌では TRUS/MRI fusion を利用した生検技術が一般化してきており、実に様々な装置が開発・市販されている。

子宮頸癌では病変範囲が前立腺に比較してやや広いと考えられることや、TRUS 画像取得時のプローブによる変形もやや強いと考えられることから TRUS と MRI を fusion した上でアプリケーション穿刺を行う方法では画像を変形して fusion する方法（DIR:Deformable Image Registration）を加える必要がある。我々は過去症例にて小線源治療時 MRI を直腸プローブ存在下に近似させて変形、その後目的穿刺部位にポイントを置いて TRUS 画像と DIR を行う試みも開始している（図6）。

3. 子宮頸癌に対する放射線治療の成績

従来の X 線透視を用いた 2 次元的な治療計画・照射が行われていた時期は、5 年生存率は FIGO 分類（2008）Ⅱ期 60-80%、Ⅲ期 40-60%、Ⅳ期 10-20% とされていた²⁵⁾。また手島らの報告によると、放射線治療を施行した症例のうち、局所再発はⅡ期で高線量率、低線量率ともに 13%、Ⅲ期で高線量

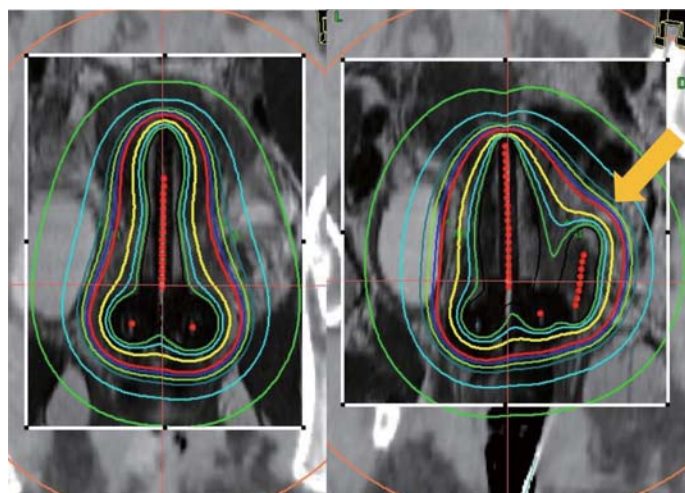


図4 子宮頸癌に対する画像誘導小線源治療の線量分布図の違い
左の腔内照射に右図矢印のように組織内針1本刺入追加することで安全に十分な線量投与が可能となる

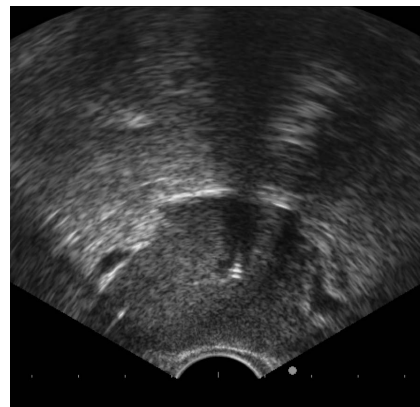


図5 経直腸超音波による子宮頸癌の描出
経直腸プローブにより子宮頸部病変の圧排、変形がみられる

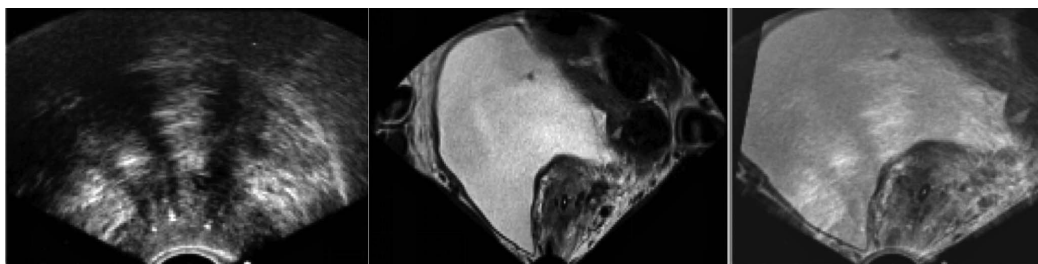


図6 子宮頸癌における TRUS/MRI fusion

左：TRUS 中央：MRI（変形後） 右：TRUS/MRI fusion

率が33%，低線量率が46%と報告されている²⁶⁾。

また，中野らは根治的放射線治療を施行した1148例につき解析を行い，10年のoverall survivalはⅡ期52%，Ⅲ期42%，cause-specific survivalはⅡ期74%，Ⅲ期59%と報告されている²⁷⁾。また，有害事象については10年でのmajor complicationはrectosigmoid colonで4.4%，bladderで0.9%とされるが，大部分は最初の5年のうちに生じるとされている。一方，small intestineについては10年でのmajor complicationが3.3%だが，20年では8.3%と治療後5年，10年を過ぎても増加し続ける傾向があるとされている。

その後本邦ではCTを同室に備えた（In-room CT）小線源治療室などの設備を持つ施設もあり，CT画像誘導小線源治療可能な施設の割合は増加しており，その良好な成績が報告されている²⁸⁻³⁰⁾。ただ，MRI画像誘導小線源治療の成績については，アプリケーション挿入・留置後にMRI撮影可能な施設が未だ少なく，まとまった報告はなされていないのが現状である。

上述のEMBRACEによるデータでは，局所制御・生存率ともに良好な成績が報告されており，また我々がMRI画像誘導小線源治療を開始してから3年のデータを比べてみても症例数は47例と少ないものの特に組織内照射併用が非常に有効となるⅢ期では良好な経過を示しており，EMBRACEに劣らない結果の可能性があるため¹⁹⁾（表1），今後の症例の解析継続，更なる蓄積が必要である。

表1 子宮頸癌における画像誘導小線源治療成績

	EMBRACE (5y)	Our study (3y)
<u>Local Control</u>		
Overall	92%	95%
stage I / II A-B	92-98% / 89-91%	96%
stage III A-B	92-100%	<u>92%</u>
stage IV	89-91%	100%
<u>Overall Survival</u>		
Overall	74%	78%
stage I / II A-B	73-83% / 74-80%	68%
stage III A-B	59-76%	<u>91%</u>
stage IV	47-48%	100%
<u>Morbidity ≥G3</u>		
GU	6%	0%
GI	2%	2%
Fistula	2.7%	2%
Vaginal	4.4%	2%

GU: genito-urinary

GI: gastro-intestinal

日本放射線腫瘍学会 第21回小線源治療部会学術大会にて発表

さ い ご に

放射線治療は手術とは異なり、体内に存在する腫瘍に対して間接的に人間が開発した技術により人体構造や腫瘍そのものを画像により確認して行う。侵襲が少ない反面、腫瘍位置の把握とその照射に関しては、腫瘍の存在と我々の認識、そして治療施行の間に様々な物質的・時間的介在があるため、不確実性が少なからず伴う。X線透視で2次的に治療を行っていた時代では遠く理想であったと思われるが、腫瘍をはっきりと real-time で見ながら放射線治療を行うことは、今や現実になってきている。我々放射線治療医として腫瘍に治療線量を処方しつつ、その周囲の正常組織には可及的に照射線量を抑えることは今後も何よりの課題であり、上記不確実性をさらに少なくするためのさらなる技術発展は期待される。そしてそれとともに、発展した技術を次はいかにして普及させ、患者への治療に還元し、治療成績の向上に結びつけられるのか、を常に考えつつ今後も日々の診療に取り組まなければならない。

本論文において開示すべき COI はありません。

文 献

- 1) 梅垣洋一郎. 放射線治療の歴史 放射線医学大系第 30 巻 放射線治療学総論 東京：中山書店, 1983.
- 2) 牧野純男. 放射線治療装置の歴史 日放線技会誌 1989; **45**: 756-766.
- 3) 日本医学物理学会. QA/QC 委員会報告 画像誘導放射線治療臨床導入のためのガイドライン (略称: IGRT ガイドライン) 医物理 2010; **30**: 49-53.
- 4) Hall WA, Paulson E, Li XA et al. Magnetic resonance linear accelerator technology and adaptive radiation therapy: An overview for clinicians. CA Cancer J Clin. 2022; **72**: 34-56.
- 5) Zelefsky MJ, Kollmeier M, Cox B et al. Improved clinical outcomes with high-dose image guided radiotherapy compared with non-IGRT for the treatment of clinically localized prostate cancer. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2012; **84**: 125-129.
- 6) Miralbell R, Bleher A, Huguenin P et al. Pediatric medulloblastoma: radiation treatment technique and patterns of failure. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1997; **37**: 523-529.
- 7) 師田まどか, 新谷暁史. 前立腺癌における画像誘導放射線治療 - 超音波画像誘導装置を中心に - 昭和学士会誌 2018; **78**: 613-616.
- 8) Robinson D, Liu D, Steciw S et al. An evaluation of the Clarity 3D ultrasound system for prostate localization. J Appl Clin Med Phys. 2012; **13**: 3753.
- 9) Al-Hallaq HA, Cerviño LI, Gutierrez AN et al. AAPM task group report 302: Surface-guided radiotherapy. Med Phys. 2022; **49**: e82-e112.
- 10) Batista V, Meyer J, Kügele M et al. Clinical paradigms and challenges in surface guided radiation therapy: Where do we go from here? Radiother Oncol. 2020; **153**: 34-42.
- 11) Betgen A, Alderliesten T, Sonle JJ, et al. Assessment of set-up variability during deep inspiration breath hold radiotherapy for breast cancer patients by 3D-surface imaging. Radiother Oncol. 2013; **106**: 225-230.
- 12) Freisleder P, Kügele M, Öllers M et al. Recent advanced in Surface Guided Radiation Therapy. Radiat Oncol. 2020; **15**: 187.
- 13) 日本磁気共鳴医学会／日本医学物理学会／日本医学放射線学会／日本放射線技術学会／日本放射線腫瘍学会合同 MR 画像誘導即時適応放射線治療ガイドライン 2021
- 14) Otazo R, Lambin P, Pignol JP et al. MRI-guided Radiation Therapy: An Emerging Paradigm in Adaptive Radiation Oncology. Radiology. 2021; **298**: 248-260.
- 15) Bertholet J, Anastasi G, Noble D et al. Patterns of practice for adaptive and real-time radiation therapy (POP-ART RT) part II: Offline and online plan adaption for interfractional changes. Radiother Oncol. 2020; **153**: 88-96.

- 16) Okamoto H, Sakasai T, Nishioka S et al. On-line Adaptive Radiotherapy Using MRI-Guided Technique. *Igaku Butsuri*. 2018; **38**: 159-165.
- 17) Haie-Meder C, Pötter R, Van Limbergen E et al. Recommendations from Gynaecological (GYN) GEC-ESTRO Working Group (I) : concepts and terms in 3D image based 3D treatment planning in cervix cancer brachytherapy with emphasis on MRI assessment of GTV and CTV. *Radiother Oncol*. 2005; **74**: 235-245.
- 18) Pötter R, Haie-Meder C, Van Limbergen E et al. Recommendations from gynaecological (GYN) GEC ESTRO working group (II) : concepts and terms in 3D image-based treatment planning in cervix cancer brachytherapy-3D dose volume parameters and aspects of 3D image-based anatomy, radiation physics, radiobiology. *Radiother Oncol*. 2006; **78**: 67-77.
- 19) Pötter R, Tanderup K, Schmid MP et al. MRI-guided adaptive brachytherapy in locally advanced cervical cancer (EMBRACE-I) : a multicentre prospective cohort study. *Lancet Oncol*. 2021; **22**: 538-547.
- 20) Murakami N, Ohno T, Toita T et al. Japanese Society for Radiation Oncology Consensus Guidelines of combined intracavitary and interstitial brachytherapy for gynecological cancers. *J Radiat Res*. 2022; **63**: 402-411.
- 21) Logan JK, Rais-Bahrami S, Turkbey B et al. Current status of magnetic resonance imaging (MRI) and ultrasonography fusion software platforms for guidance of prostate biopsies. *BJU Int*. 2014; **114**: 641-652.
- 22) Elkhoury FF, Simopoulos DN, Marks LS et al. MR-guided biopsy and focal therapy: new options for prostate cancer management. *Curr Opin Urol*. 2018; **28**: 93-101.
- 23) Kongnyuy M, George AK, Rastinehad AR et al. Magnetic Resonance Imaging-Ultrasound Fusion-Guided Prostate Biopsy: Review of Technology, Techniques, and Outcomes. *Curr Urol Rep*. 2016; **17**: 32.
- 24) Minami Y, Kudo M. Ultrasound fusion imaging technologies for guidance in ablation therapy for liver cancer. *J Med Ultrason*. 2020; **47**: 257-63.
- 25) 大西洋, 唐澤久美子, 唐澤克之. がん放射線治療 2010 東京: 篠原出版新社, 2010.
- 26) Teshima T, Inoue T, Ikeda H et al. High-dose rate and low-dose rate intracavitary therapy for carcinoma of the uterine cervix. Final results of Osaka University Hospital. *Cancer*. 1993; **72**: 2409-2414.
- 27) Nakano T, Kato S, Ohno T et al. Long-term results of high-dose rate intracavitary brachytherapy for squamous cell carcinoma of the uterine cervix. *Cancer*. 2005; **103**: 92-101.
- 28) Kusada T, Toita T, Ariga T et al. Computed tomography-based image-guided brachytherapy for cervical cancer: correlations between dose-volume parameters and clinical outcomes. *J Radiat Res*. 2018; **59**: 67-76.
- 29) Imano N, Wadasaki K, Nishibuchi I et al. Comparison of clinical outcome between computed tomography-based image-guided brachytherapy and two-dimensional-based brachytherapy for cervical cancer. *Gynecol Oncol Rep*. 2019; **29**: 79-82.
- 30) Ohno T, Noda S-E, Okonogi N et al. In-room computed tomography-based brachytherapy for uterine cervical cancer: results of a 5-year retrospective study. *J Radiat Res*. 2017; **58**: 543-551.

Development of Image-Guided Radiotherapy and High-Precision Radiotherapy

Department of Radiation Oncology, Japanese Red Cross Kyoto Daini Hospital
Daisuke Shimizu

Abstract

In recent years, remarkable progress has been made in the development of radiotherapy devices and their technology, and “high-precision radiotherapy” is now becoming widespread. We need to determine the tumor location precisely using imaging diagnoses to support appropriate therapy. Diagnostic imaging devices have been installed either in the treatment equipment or in the same room, thus enabling “image-guided radiotherapy.” Using these modalities, we can refer to diagnostic images and correct the irradiation site. Radiotherapy devices with fluoroscopy or computed tomography (CT) have already spread, and consequent improvement in the treatment outcome has been reported. Devices equipped with magnetic resonance imaging (MRI) capabilities have also appeared, and their usage in treatment has started. We are now expecting their further development and spread. Image-guided brachytherapy approaches using CT and MRI have also been developed, and good results have been reported. The placement of the radiation source is also important in brachytherapy, and the correct placement of the applicator using diagnostic imaging will be explained, taking cervical cancer as an example.

Key words: high precision radiotherapy, CT, MRI, image-guided radiotherapy, brachytherapy