



前立腺がん放射線治療の進歩 ～MRIリアックに至るまで～

宇野 隆 先生 千葉大学附属病院 放射線部部長 教授

本日は、放射線治療の歴史と進歩、高精度放射線治療、MRIリアック、前立腺がんの放射線治療などについてお話しさせていただきます。

放射線治療の歴史と進歩

1895年末、レントゲン博士によりX線が発見され、まもなくがんの治療に使われ始めました。1950年代にはコバルト照射装置といったものが使われていましたが、1970年代にシンプルに照射するだけのリニアックという装置が治療に使われ始めました。

21世紀になり、狙いをつけてピンポイントで当たり、呼吸に同期させたり、動くものを追いかけたりする粒子線治療やIMRT（強度変調放射線治療）というものが出てきました。今はいろいろあり過ぎて、患者さんにとっては、どれが良いのか分かりにくい状態になっていると思われます。

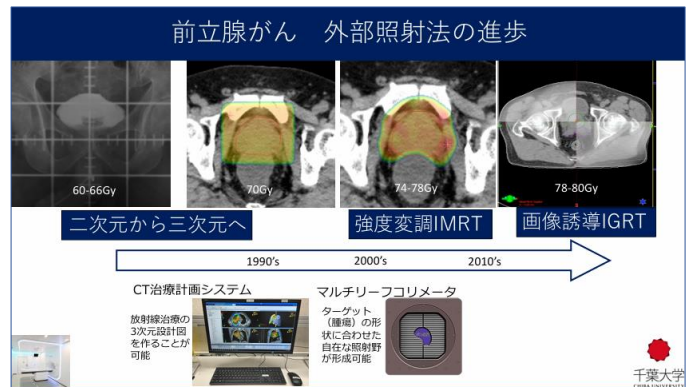


放射線治療では、まずは狙いを正確につけるということが重視されてきました。あらかじめ撮影した患者さんの画像をコンピュータに取り込んで、どのくらいの線量の放射線を、どのように当てるかという治療計画（プラン）を立て、放射線治療の良し悪しを競ってきました。

しかし、コンピュータ上でたとえ素晴らしい治療計画ができて、実際、身体の中でそれが再現されないという意味がありません。いかに正確に照射するかという

ことが競われるようになってきました。そこで出てきたのが画像誘導技術であり、その中で最も新しいのが、MRIで体内の様子を見ながらがんを正確に狙えるMRIリアックという装置になります。

高精度放射線治療

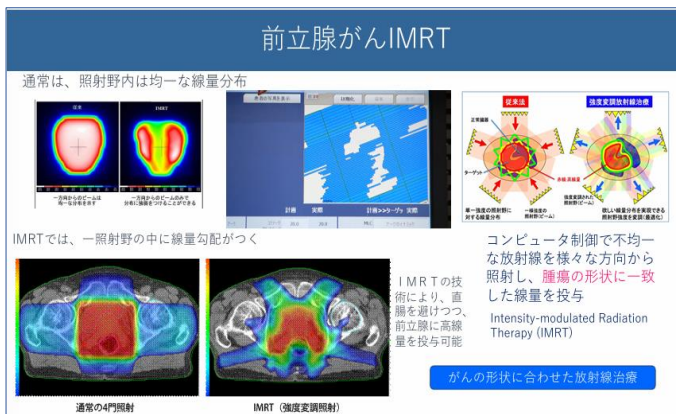


1980年頃、前立腺はX線透視では見えず、造影剤が膀胱に溜まっている様子は映るので、それを頼りに前立腺の位置に見当をつけて照射していました。これでは、前立腺に正確に放射線が当たっているかどうかよくわからない上に、放射線を当てたくない正常組織にも放射線が当たってしまうため、放射線の線量も限られていました。

1990年頃、CTを使って位置合わせができるようになりましたが、照射する装置が放射線の線量や形を自由に作れず、前後左右から四角い範囲に均一な放射線を照射するという時代でした。ある程度の治療線量は当てられるようになりましたが、前立腺の後側にある直腸の一部や恥骨にも放射線が当たってしまい、後遺症である晩期障害が問題となっていました。

● 強度変調放射線治療：IMRT

2000年前後、強度変調放射線治療（IMRT）が始まって、直腸を避けつつ、前立腺に70Gy以上の線量をあてられるようになりました。



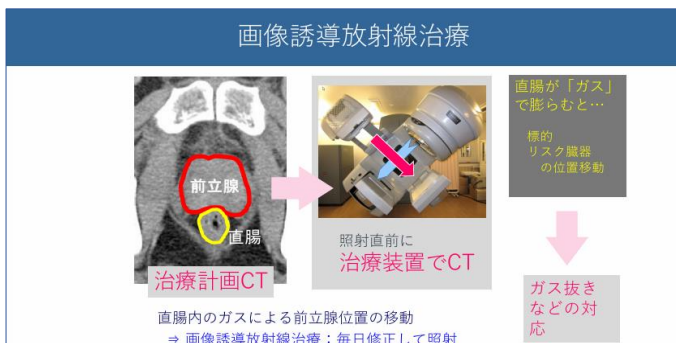
照射口にあるスリット状の遮蔽体を自由に動かすことによって、まだらな放射線を多方向からかけて、身体の中で精密な3次元の照射ターゲットを作っています。人間の頭では容易に考えられない、それぞれの方向からの理想的な照射のしかたを、コンピュータが計算してくれる時代になり、現在、ほとんどの施設でこのようなIMRTが用いられています。

● **画像誘導放射線治療 : IGRT**

さらに今、画像誘導放射線治療(IGRT) を用いながらIMRTを行うという時代になりました。IGRTは、診断用放射線と治療用放射線を分けて出せる装置です。

例えば、前立腺がんの場合、治療計画として、照射直前に患者さんに治療寝台に乗ってもらい、診断用放射線を出して簡易的なCTを撮影します。直腸がガスで膨らんでいたりすると、標的である前立腺の位置が動いてしまい、放射線が前立腺がんからずれて当たってしまう恐れがあります。

そこで、適切な位置になるように直腸のガスを抜いたり、治療計画を修正したりして、照射することが行われるようになりました。



● **定位放射線照射 : SRT**

サイバーナイフというのは定位放射線照射 (SRT) の一例ですが、ミサイル追従システムのコンピュータ制御技術を応用し、動く標的に対して狙いをつける工業用ロボットに、放射線治療装置リニアックを搭載した装置になります。

追尾のために金マーカーを埋め込むことが多く、サイバーナイフを使って定位放射線照射を行いますと、前立腺の形に合わせて正確に放射線を当てることができます。

画像誘導を伴う最近のがん放射線治療は、次のような方向を目指しています。

- ①より狭い範囲に
標的を正確にとらえ、照射線量を増やす
- ②より正確に
正常組織を避け、副作用を減らす
- ③より短期間で
照射回数を減らし（1回の照射線量をあげ）、患者さんの便宜をはかる

MRリニアック



● **開発から導入まで**

MRリニアックの外観はMRIに似ており、開発に20年近くかかり、ようやく臨床に登場してきた新しい治療装置です。私は、2014年、米国放射線腫瘍学会 (ASTRO) で、MRIを放射線治療に用いることを勉強する機会があり、この頃から画像誘導の診断装置は、CTからMRIに変わっていく予感がありました。2018年には、ユトレヒト大学でこの装置を開発、導入したということで見学に行きました。

2019年、日本でMRリニアックの製造販売承認が得

られ、2020年、コロナ禍の真っ最中でしたが、外国人技術者に来ていただき、設置作業を行いました。千葉大学では2021年に稼働を開始、2022年には東北大学と大阪公立大学にMRリニアックが入り、現在、世界では受注と稼働を合わせると、すでに100台を超えています。

●MRリニアックの仕組み

MRリニアックは、真ん中部分が1.5テスラのMRIになっており、それを取り囲むように、放射線の照射装置リニアックが回転する仕組みになっています。



通常の放射線治療装置よりも直径が大きいため、床を掘ったり天井を高くしてMRリニアックを入れるための準備が必要です。

リニアックから照射された放射線は、MRIの磁場を通過する際、電子が発生し、物理的な影響で放射線が乱れてしまうのですが、それをコンピュータによって補正するという、非常に繊細かつ複雑な装置になっています。

MRリニアックとは？

- 1.5T-MRIと放射線治療装置（リニアック）が一体化
- MR画像誘導即時適応放射線治療
- MRシネ画像で**放射線治療の体が見える**
- 治療は**IMRT**、**体幹部定位放射線治療**
- 正確な照射が可能で**治療回数が少ない**（超寡分割照射）

前立腺がん ⇒ 2～5回



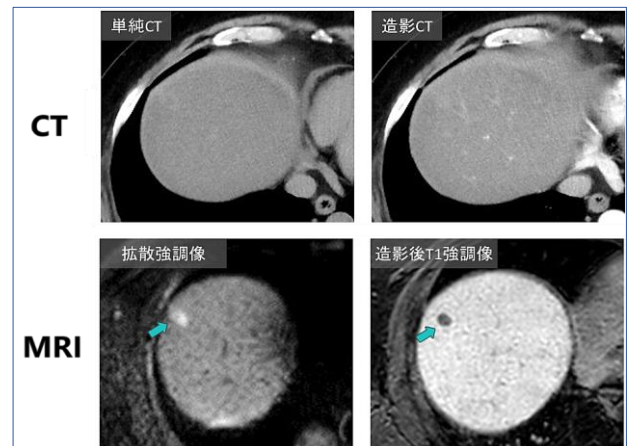
MRリニアックは、1.5テスラのMRIとリニアックを一体化させたものであり、MR画像誘導即時適用放射線治療（MRgART）というのですが、放射線が当たっている体内の様子がよく見えるということが特徴の一つになります。治療にはIMRTとSBRT（体幹部

定位放射線治療）を用いていますが、正確な照射が可能なので、SBRTによる超寡分割照射に適した装置になっています。通常の前立腺がんであれば2回（臨床試験）から5回、治療寝台に寝ていただくだけで、簡単に終わります。

●MRリニアックの利点

① 正確性（Image-guidance）

治療計画を立てる際や画像誘導を行う際の正確性を高めるには、撮影機器はCTではなくMRIを用いることです。CTとMRIの機能画像では、かなりもの見え方が異なるためです。



これは肝臓の画像ですが、CTでは、どこに病変があるのか、専門医でもわからないのですが、MRIの機能画像で見ると病変が見えてきます。

これをコントラスト分解能と呼んでいます。

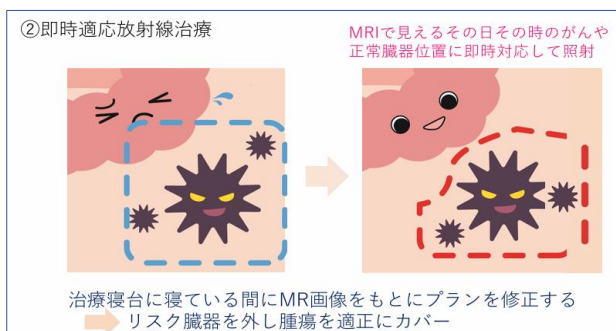
コントラスト分解能の高い1.5T-MRIを用いた正確な治療



CTでも画像誘導は行っていますが、解像度（画像の輪郭）が不十分なため、金属マーカーによる追尾が必要になります。MRIでは画像が鮮明なので位置合わせがしやすく、金属マーカーは不要となります。

② 即時適応放射線治療 (Adaptive Planning)

これまで、準備された治療計画を、位置がずれた分だけ修正して照射していましたが、即時適応放射線治療(ART)では、放射線治療室の寝台の上で撮影した患者さんの画像を見て、照射直前に最適なIMRTの治療計画をその都度作成して (daily online planning)、その日の患者さんの状態にあった放射線を照射するという方法です。



即時適応放射線治療では、これから照射するという患者さんの画像に合わせて、消化管を避けたり、前立腺の位置が5mm動いていたら、その動いた位置に対して治療計画を作り直したりして、保護すべき正常な臓器を避けながら、がん病巣に適正な照射を行うわけです。

③ リアルタイム (Beam-on Imaging)

がん放射線治療の「見える化」とは、体内の病巣の動きを見ながら照射するということです。

外科医や内視鏡医は、必ず肉眼、内視鏡、カメラなどで病巣の動きを見ながら治療しますが、それと同じように、体内の病巣の動きをリアルタイムに確認しながら、がん病巣に放射線を正確に照射するわけです。

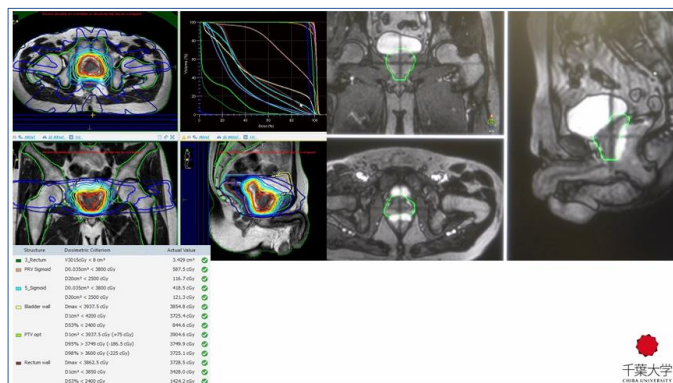
分解能の高いMRIの機能画像を用いて、がん病巣や避けるべき正常臓器の輪郭を修正して、IMRT再治療計画 (リプラン) を行い照射を開始します。

放射線照射中はMRシネ画像で照射部位をリアルタイムに監視します。元々の治療計画のまま放射線をかけると、もし放射線に弱い臓器が動いたら障害を受けるので、MRリニアックで撮影した画像をもとに、放射線をかけたくない臓器の輪郭を囲い直して、それに対して今、その状態にあるがん病巣を、狙い撃ちするといった治療を行います。

前立腺がんの放射線治療

MRリニアックで、実際の症例が一番多いのは前立腺がんです。次に消化管が動いて放射線治療の難しい臓器がん、肝臓がんなどとなっています。

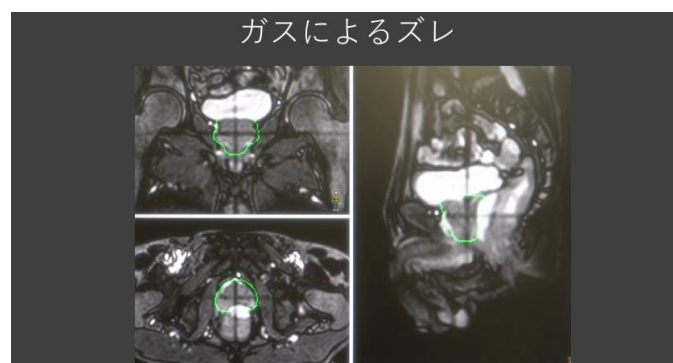
MRリニアックでは、照射範囲を絞り、即時適応を行い、リアルタイムで見ながら照射をすれば、正常組織への線量は減らせるので、1回の照射線量を増やして、照射回数を減らす超寡分割照射が可能となります。前立腺がんでは、通常は5回の超寡分割照射が多いのですが、小腸がかぶさってくるような場合には、その部分を照射範囲から際どく削り取って、3~5mmのマージンをとって照射しています。



この図では、前立腺に放射線が集中している様子が、なんとなく見えるのではないのでしょうか。

周辺の臓器に対しても、許容線量を細かく設定し、それを満足する時だけ、照射が可能な仕組みになっています。

照射中の様子をリアルタイムで見ていると、直腸の中をガスが下りてきて、前立腺の位置が動いてしまうのが見えることがあり、すぐに治療を止めるのですが、従来はこういうことが、1%未満にせよ直腸出血の原因になっていたと思われます。



一般的な放射線治療では、膀胱の尿量についても、細かい指示を受けることが多いと思うのですが、リアルタイムでそれらの様子が見えるMRリニアックでは、そこまでうるさく言うことはありません。前立腺と直腸間のジェルスペーサーは有効だと思うので使用しています。

前立腺がんの治療でも、通常の放射線治療がやりにくいような場合、まれに重粒子線でも難しいと思われるような場合もありますが、MRリニアックでは、精嚢浸潤を伴う前立腺がんや、他臓器に隣接するリンパ節などのオリゴ転移に対して、また骨盤、脊椎などの骨転移にも有用であり、これらはすべて保険適用が可能となっています。

本日のまとめ

● MRリニアックに至るまで


2000年以降は、コンピュータ上で綺麗な放射線の線量分布の技術が競われてきましたが、この10年間は、綺麗な線量分布をどうやって身体の中で実際に達成するかという画像誘導技術の優越性が競われ、CTが治療装置に搭載されたり、マーカーを打ち込んで追尾したりというようなことが行われてきました。

そして、MR画像誘導の登場に至ったわけです。

MR画像誘導即時適応放射線治療 (MRgART)

がんを正確に捉え正常組織を外すための画像誘導技術
MRリニアックによる可視化、即時適応放射線治療

<ol style="list-style-type: none"> ① より狭い範囲に ② より正確に ③ より短期間で 	}	<p>マージン縮小 侵襲の低減・マーカーレス 急性期反応の低減 ⇒ 「寡分割」化</p> <p>MR sim: X線被ばくの低減 病変・臓器を見ながら照射</p>
--	---	--



千葉大学
スライド作成: 千葉大学大学院医学研究科 放射線科 野野 隆 (NONONO RYU)

照射範囲を、より狭く、より正確に、より短期間で（超寡分割照射）、低侵襲な治療を（マーカー不要）行えるようになりました。MRIの機能画像の活用は、治療計画で正確な狙いをつけるために使うのはもちろんですが、照射中に機能画像を撮ることにより、治療の効果、レスポンスも評価できる時代になってきました。MRIの使用は被曝の低減にもつながり、リアルタ


イムで病変や臓器を見ながら照射することは、正確性の向上と共に、安心感も与えることができると思われます。

今一度、その特徴をこのスライドで示しておきます。

放射線治療の最新の話: まとめ

MRリニアック: 新たな画像誘導

- MRによる正確な治療計画・画像誘導
- 照射範囲縮小 ⇒ 超寡分割照射 (少ない回数)
- 治療寝台上でのリプラン ⇒ 即時適応放射線治療
- ビームオンモニター ⇒ 体内を見ながら照射
- 機能画像 ⇒ 治療計画と評価



千葉大学
スライド作成: 千葉大学大学院医学研究科 放射線科 野野 隆 (NONONO RYU)

● 放射線の治療施設等を調べたい

日本放射線腫瘍学会のホームページでは、放射線治療専門医の名前と、所属施設、学会認定施設、IMRTやSBRTの可能施設が掲載されています。現在、専門医は1,475名、放射線治療施設は800施設以上、うち学会認定施設は265施設ぐらいです。

各施設に照会いただければ、それぞれの装置や得意分野の違いが分かります。また、学会のホームページには、放射線治療について、動画や冊子など、いろいろな説明が載っています。

放射線治療についてわからないことがありましたら、ぜひ放射線治療専門医の外来を受診していただければと思います。

(要約: 水太郎)