

特集 高精度放射線治療における画像の役割

総 説

放射線治療における画像の役割 —医学物理学的視点から—

新保 宗史、高橋 健夫、本戸 幹人、西村 敬一郎、山野 貴史

埼玉医科大学総合医療センター 放射線科

The role of diagnostic imaging in radiotherapy: From medical physical point of view

Munefumi Shimbo, Takeo Takahashi, Mikito Hondo,
Keiichiro Nishimura, Takafumi Yamano

Department of Radiology, Saitama Medical Center, Saitama Medical University

要旨

昨今の放射線治療において、断層画像はきわめて有効に用いられている。従来の解剖図や経験に基づいて実施されてきた放射線治療から、画像情報をもとに患者個別の適切な照射方法が選択できるようになり、オーダーメイド治療が実施できるようになった。また、治療に用いるビームデータを治療計画装置に登録することで、体内線量分布の表示が可能となり、ターゲット（腫瘍病変）、リスク臓器（OAR; Organ at Risk）の線量評価も容易になっており、良好な治療効果が期待される。一方、放射線治療に使用される診断機器は、治療を行うための様々な品質管理が要求される。これらの品質管理を行うことで適正な治療が実施される。高精度放射線治療を実施するために断層画像は不可欠な情報となっている。

Abstract

In late years diagnostic images are used for radiotherapy effectively. The radiotherapy has been taken based on two-dimensional imaging informations before. However, we can get three-dimensional CT or MR images easily now, and highly precise radiotherapy is taken based on these three-dimensional informations. Quality assurance and quality control about diagnostic imaging is very important to perform highly precise radiotherapy, for example, stereotactic radiotherapy and intensity modulated radiotherapy, etc.

Key words 放射線治療、画像融合、CT値、QA/QC

別刷請求先：〒350-8550 川越市鴨田辻道町1981

埼玉医科大学総合医療センター 放射線科 新保 宗史

TEL：049-228-3511 FAX：049-226-5284

はじめに

放射線治療において、どの部位にどの程度の放射線を投与するのかが決定することがもっとも重要であるが、断層画像が治療計画に利用できない状況では、X線シミュレータが用いられてきた。このX線シミュレータは治療装置と同じ幾何学条件が実現できるよう設定され、治療ビームの照射方向や照射野を決定するために使用される。また線量計算を行うにあたっては解剖図、線量分布データシートの利用や、体輪郭取得、内部臓器の同定・密度取得、線量分布計算には専用の治療計画装置(RTP)が使用されてきた¹⁾。CT (computed tomography) や MRI (magnetic resonance imaging) 装置などにより断層画像が治療計画に提供されるようになり、患者個々の内部臓器の位置が容易に特定できるようになった。それにより治療すべき部位すなわちGTV (肉眼的腫瘍体積) やPTV (計画標的体積) が明確に指定できるようになり、より質の高い放射線治療が提供できるようになってきた。断層画像診断の進歩が高精度放射線治療の進歩に結びついてきたと考えられる。今回、CTやMR画像を治療計画に用いる際の医学物理学的注意点について、放射線治療の立場から触れたいと思う。

断層画像情報と放射線治療

放射線治療では、どの部位に、どの程度の放射線を投与するのが大切であり、3次元断層画像が得られない時期にはX線シミュレータを用い、2次元X線透視画像を用いて治療計画を施行していた。

- ・骨の構造を参考に照射野を作成
- ・照射部位、照射方向、照射野形状はX線透視画像で確認
- ・投与される線量は、標準人体の臓器の形状・密度等を参考に計算

その後CTの進歩により、CT上で腫瘍の存在範囲、照射野に含める領域の範囲、リスク臓器などを指定し、用いる放射線のエネルギーや適切な照射野の形状を選択できるようになった²⁾。これは単に2次元X線透視画像と解剖図から体内線量分布をイメージするより、患者個別の臓器の形状ならびに位置を確認しながらの計画作成となり、より良い精度で治療計画を施行することができる。CTの利用での重要な点は治療計画装置内に治療装置

個別のビームデータを登録することである。これによりCTシミュレータの画面上にCTの画像と線量分布図を重ねて表示し、治療部位内の線量の偏りや、周辺重要臓器に対する放射線の入り具合を視覚的に確認しながら治療計画を行うことができるため、より適切な線量分布で治療を行うことができる。放射線治療の手順と、断層画像診断機器の関わり合いについて図1に示す。

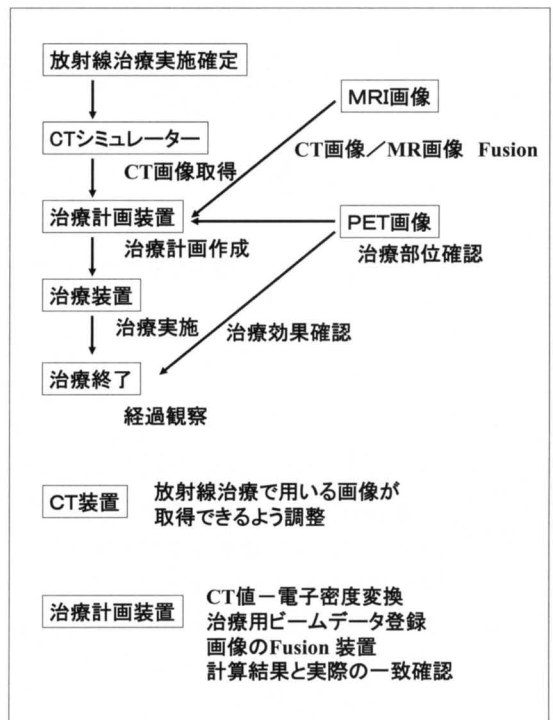


図1：治療の流れと放射線治療を行うためにCT装置、治療計画装置に求められる性能

診断に使用される断層画像機器の利用について

通常は診断に使用される断層映像診断機器を放射線治療に用いる場合には、施設毎の治療装置のビーム特性データを治療計画装置に導入する必要があるが、これ以外にも

- ・CT値－電子密度変換テーブル作成、登録
- ・CT寝台を治療装置の寝台と同等のものに変更
- ・治療で要求される幾何学精度：レーザーマーカー位置精度やスケールの正しさ、画像のゆがみ、水平鉛直の確保等を画像取得機器にも要求などの品質を保証 (Quality Assurance) した上で治療計画に用いる必要がある^{3) 4)}。

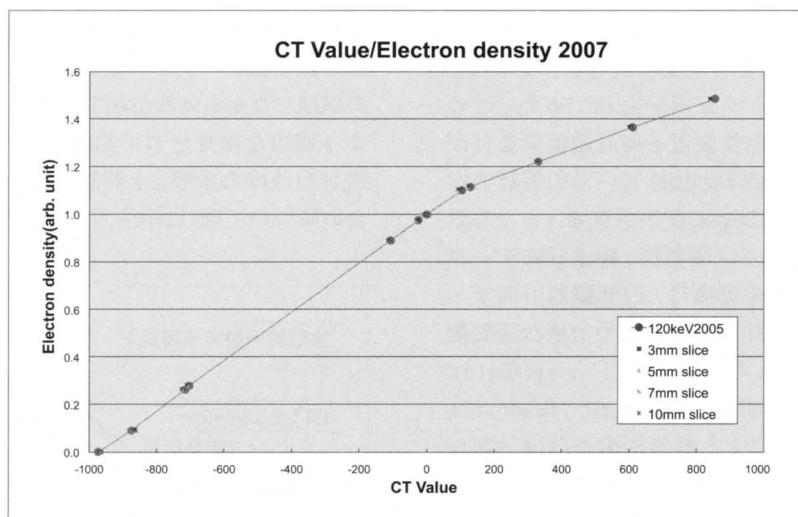


図2：CT値－電子密度変換テーブル

CT値－電子密度変換は主に線量分布計算時に使用される。治療で用いられる高エネルギーX線は患者体内で減衰し照射部位に吸収されるが、この減衰の程度は、物質中の電子密度に比例する。通常CTが診断で使用される場合には電子密度の濃淡を視覚的に分別するために、必要な濃度領域を拡大表示し、明瞭に判断できる画像に調整できることが重要だが、放射線治療の線量分布計算に使用する際には実際の電子密度を反映している必要がある。

電子密度の測定は水を封入したファントム（人体模擬模型）内⁵⁾に既知の電子密度を持つ物質を配置しCT撮影を行い、この画像から得られるCT値を元の電子密度と結びつける。場合によっては、頭頸部、体幹部など、FOV（Field of view：撮像野）サイズあるいは、画像周辺部と中央付近などの位置の相違によってこの係数が異なる場合もあるため、頭部用や体幹部用といった異なるサイズのファントムを利用しサイズ別のCT値－電子密度変換係数表を作成したり、同一電子密度の物質を外周、中央付近の2箇所に配置して確認する場合もある。

現在、治療で使用されるCTシミュレーション装置はkeV領域のX線を用いるが、高エネルギーX線（4MV～20MV）領域とは線質が異なるため、厳密にはMV領域のCT装置を用いるほうが好ましい。特に粒子線治療などでは、X線との線質が異なるための相違を減らすために、粒子線を用いたCT装置

が研究されている⁶⁾。得られる変換テーブルを図2に示す。重要な部分は、空気、肺、組織（ほぼ水と同等）、骨であるが、頭頸部の場合など、金属に関する高電子密度の領域及びこれに起因するアーチファクトが問題となることもある。通常この変換テーブルは毎年測定を行い変化がないか確認している。

吸収線量の分布は電子密度に依存する。現実に近い線量分布計算をするためにモンテカルロシミュレーションが現在最も正確なものと言われているが、計算に多くの時間が必要になり、現時点では実際の治療計画では使用できない。そのため演算計算機器の性能向上や線量計算手法のさらなる開発が進められている。現在、線量分布を計算するアルゴリズムがいくつか存在するが、それぞれの特徴をよく理解する必要がある。また肺や肝臓などの実質臓器、消化管などの管腔臓器の電子密度の差異を考慮（不均質補正）するかどうかについても、放射線治療の方法が例えば、高精度3次元治療や強度変調照射（IMRT）なのか等によつて的確に判断する必要がある。

放射線治療器で患者が寝る寝台と治療計画用CT装置の寝台は同じ材質、同じ規格であることが望ましい。治療ビームが寝台を通過する際に線量が減弱し、線量計算上で許容できない線量減少が起こる場合には、それを補正する必要がある。また寝台は患者の体重によるたわみが発生するが、このたわ

みによる位置のずれや角度の変化がCT撮影時と放射線治療実施時で同等であることは、治療のセットアップ精度の向上に結びつく。

体内の位置の確定を行うことはCTガイド下生検でも行われる。CTガイド下生検では画像上で位置の同定を行い空間座標については議論しないが、放射線治療用CTでは3次元座標上での位置を指定する必要がある。またCT装置上で放射線治療の際のアイソセンターをマーキングできれば、治療の際の患者の固定目標が明確になるため、CT画像もしくは治療計画装置上で指定された位置に対して精度良くレーザーマーカーが示されることが必要である。また、画像の水平、スケールの正しさ、歪みの有無は、治療計画の精度に影響するので、治療で使用する前に確認する必要がある。

このように、診断で使用する断層機器を放射線治療で利用する際には、通常の機器導入作業以外に放射線治療用の品質保証／品質管理(QA/QC: Quality Assurance/Quality Control)を行う必要がある。放射線治療に関わる機器及び接続、人員等すべてにいえることだが、装置の導入、入れ替え、システム更新の際には十分な時間を確保や人員を配置し、使用機器ならびに機器間の接続、治療手順などに関して十分なQA/QCを実施し医療過誤が起こらないよう配慮しなければならない。

CT-MR 画像融合の有用性と精度について

CT画像とMRI画像の画像融合により脳腫瘍など、腫瘍部分の正確な同定がCTのみでは困難な場合に、

MR画像(単純もしくは造影)を用いて照射部位すなわち肉眼的腫瘍体積(GTV)を決定し、これをCT画像に移して線量計算などを行うことに使用する。CT画像と、MR画像、治療計画装置上での画像融合を図3に示す。この画像融合は平行移動、回転移動に配慮して3次的に座標計算を行い、骨構造や実質の形状を一致させる。MRIの歪みを補正する機能も用いられている。現時点では核医学の診断機器で行われているCTの画像とFDG-PETの画像等の融合に比べ位置精度の高いものとなっている。

CTとMRI両方で明確に位置を確定できるマーカーがあれば、位置座標の一致の精度などを議論できるが、最初から体内にマーカーがある場合にはその点を設定の基準にすることになるため、現状は画像融合の一致の精度について評価関数で行う場合が多い。

照射部位の最終確認

治療前に照射位置を確認するPortal Image(通常、国内ではLG: Liniac Graphyと呼ばれる)は治療装置で治療ビームを使って撮影される透視画像であり、空間分解能はよくないが、実際の治療ビームが体のどこに入っているか確認できる)を確認するための基準画像を取得できる。X線シミュレータを利用した放射線治療では、治療装置と同等のアライメントでX線管、IP(imaging plate)を設定し画像を得ていたが、CTシミュレータでは得られる3次元の電子密度分布から、治療装置の幾何学配置を考慮して得られるDRR画像(Digitally reconstructed radiography)を出力すること

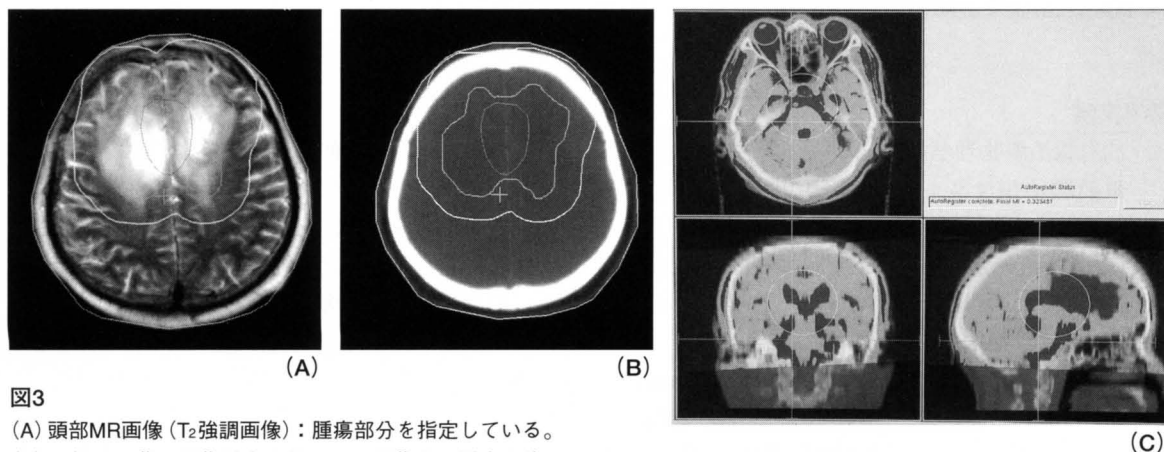


図3

- (A) 頭部MR画像(T₂強調画像): 腫瘍部分を指定している。
 (B) 頭部CT画像: 画像融合を行い、MR画像上の腫瘍を移している。
 (C) 治療計画装置上でCT画像とMRI画像を画像融合する。

カラー写真: 49-(49) 参照

ができる。これを基準画像として治療装置に患者をセットアップした後、治療前に照射位置を治療ビームで確認している(図4)。

例えば定位放射線治療は1回あたりの投与線量が大きく、出力線量の間違いや投与位置の間違いが有害事象の発生に直結する。日常のQA/QCが重要であるが、さらに治療開始前、治療中でも適宜 Portal Imageを取得し、照射位置や骨構造、PTV位置を確認しながら照射を行うことが医療過誤防止に有効である。また、このPortal Imageによって照射位置のずれが確認された際には、その原因が患者の体内臓器の移動なのか、患者の固定方法の問題なのか、治療装置の問題なのかを判定し、対応する必要がある。

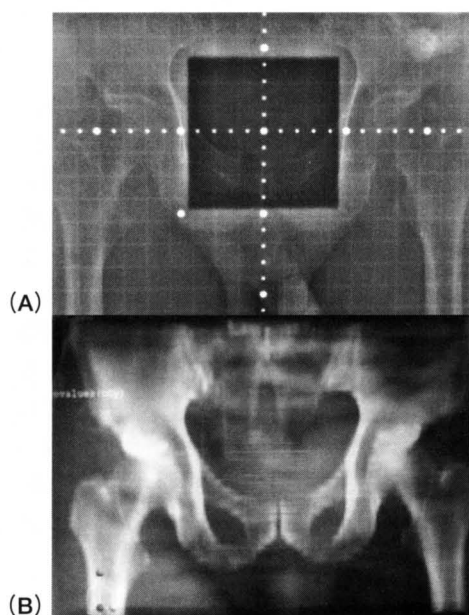


図4

- (A) 治療計画装置からCT電子密度の3次元分布を元に電子密度画像と照射位置を示したDRR画像(Digitally reconstructed radiography)が出力される。
- (B) 治療ビームを用いて取得したPortal Imageに示す。細かな構造は確認できないが、実ビームを用いて照射位置を確認できることは重要である。

診断用画像利用の今後の展望

CTやMRでは、体内臓器は静止しているものとしてすべての撮影が行われる。呼吸運動に対して十分速くスキャンができれば、呼吸性の移動など時間軸を含めた撮影が可能となるため、呼吸性移動より十分速いタイミングでの測定、さらには拍動と同期した測定などの装置が研究されている。また、治療計画用のCT撮影時と、治療時では、肺の状態、胃の内容物の変化、排尿のタイミングなどで、PTVの位置がずれてしまうことは頻繁に起こる。これに対応するため画像誘導放射線治療(IGRT; Image Guided Radiotherapy)が行われるようになってきている。

しかし体内の臓器がPTVやOARになるため、位置情報の不確定さを解消することはできない。物理技術的に達成できる範囲で精度を向上させることは、良質な高精度放射線治療を提供するために必要である。

参考文献

1. 放射線治療物理学第2版：西臺武弘：文光堂
2. 放射線治療マニュアル改定第2版：平岡真寛 他：中外医学社
3. Quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning: AAPM Task Group 53, Med. Phys. 25 (10), 1773-1829, 1998
4. Quality assurance for computed-tomography simulators and the computed-tomography-simulation process: AAPM Task Group 66, Med. Phys. 30 (10), 2762-2792, 2003
5. 草野陽介、蓑原伸一、石居隆義、他：治療計画用CT値校正のためのQA/QCツールの開発。医学物理学会誌. Vol. 26, No. 4, 163-172, 2006
6. 村石浩、西村克之、阿部慎司、他：重イオンCTにおける空間分解能の補正。医学物理学会大会文集. Vol. 27, Supplement No. 2, 141-142, 2007

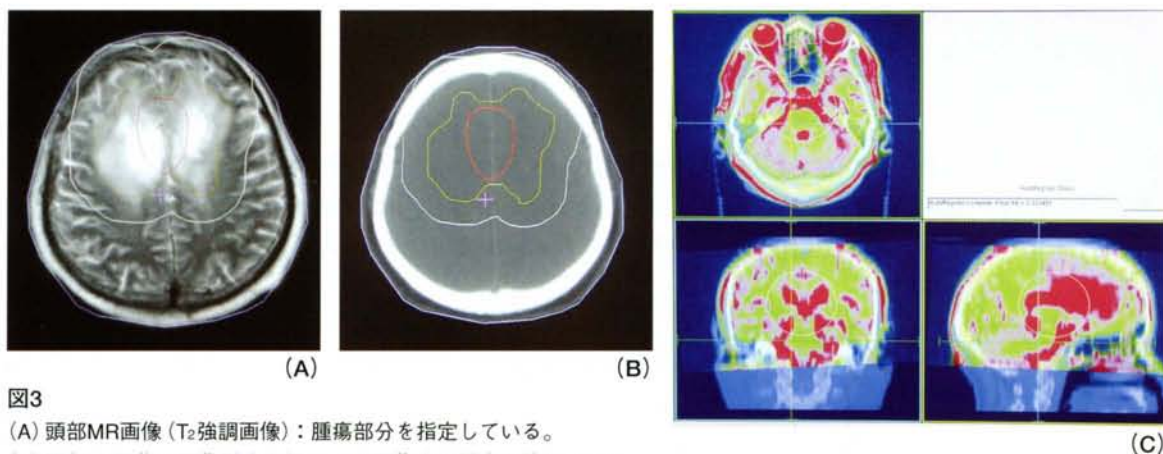


図3

- (A) 頭部MR画像 (T₂強調画像)：腫瘍部分を指定している。
 (B) 頭部CT画像：画像融合を行い、MR画像上の腫瘍を移している。
 (C) 治療計画装置上でCT画像とMRI画像を画像融合する。

37-(37)

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、(社)学術著作権協会に委託致していません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619