

特集 高精度放射線治療における画像の役割

総 説

放射線治療計画における画像の役割② トモセラピー

河村 英将^{1,2)}、桜井 英幸²⁾、岡本 雅彦²⁾、江原 威²⁾、入江 幹生¹⁾、萩原 稔¹⁾、
武田 悟¹⁾、伊藤 晴夫¹⁾、須田 悟志¹⁾、安藤 義孝¹⁾、中野 隆史²⁾

¹⁾ 日高病院 腫瘍センター

²⁾ 群馬大学 大学院医学系研究科 腫瘍放射線学

The role of diagnostic image in radiotherapy treatment planning ② TomoTherapy

Hidemasa Kawamura^{1,2)}, Hideyuki Sakurai²⁾, Masahiko Okamoto²⁾, Takeshi Ebara²⁾,
Mikio Irie¹⁾, Minoru Hagiwara¹⁾, Satoru Takeda¹⁾, Haruo Ito¹⁾, Satoshi Suda¹⁾,
Yoshitaka Ando¹⁾, Takashi Nakano²⁾

¹⁾ Radiation Therapy Section, Tumor Center, Hidaka Hospital

²⁾ Department of Radiation Oncology, Gunma University Graduate School of Medicine

要約

トモセラピー (TomoTherapy) はヘリカルCTのスリップリング上にライナックを搭載した放射線治療装置である。CT用のディテクターを持ち、各治療前にライナックのビームでmegavoltageのCTを撮影し、治療計画時のCTと重ね合わせを行うことで照射部位のずれを修正して治療を行う画像誘導放射線治療が可能である。また、寝台の移動、ガントリーの回転、コリメーターの動きを組み合わせることで柔軟な強度変調放射線治療が可能である。トモセラピーは病変の形に合わせた放射線治療を正確な部位に行うことができる、画像と放射線治療を結びつける一つの理想的な形として期待される。

Abstract

TomoTherapy is a radiation therapy device built into the CT equipment. It enables to perform not only image-guided radiation therapy with megavoltage CT but also intensity-modulated radiation therapy by dynamic combination of gantry rotation, multi leaf collimators and couch sliding. TomoTherapy is a unique approach to link imaging modality with radiation therapy.

Key words

トモセラピー、画像誘導放射線治療、強度変調放射線治療、TomoTherapy、Image-guided radiation therapy、Intensity-modulated radiation therapy、Adaptive radiation therapy

別刷請求先：〒371-8511 群馬県前橋市昭和町 3-39-22

群馬大学 大学院医学系研究科 腫瘍放射線学 河村英将

TEL：027-220-8383 FAX：027-220-8397

はじめに

コンピューターや治療装置の進歩によって、病巣の形状に合わせ正確に放射線を照射する技術が進歩している。さらに、ここ数年は照射時の位置再現性にも配慮した治療が実現しつつある。通常のライナックを用いた定位照射や強度変調放射線治療をはじめとする高精度な治療が工夫されているが、その一方で、様々な技術を応用した高精度放射線治療の専用装置が次々に誕生している。トモセラピー (TomoTherapy) はそういった専用装置の一つであり、コンピューター断層撮影装置 (Computed Tomography; CT) の技術を応用し、ヘリカルCTのスリッピング上に、X線管球の代わりに6MVのライナックを搭載した放射線治療装置である。そのユニークな構造によりCTの撮影とヘリカル走査による線量分布の良い放射線治療とを実現している。今回は画像の利用を中心にトモセラピーによる高精度放射線治療の実際について概説する。

トモセラピーの特徴

トモセラピーの概観および内部構造を示す。(図1・図2) トモセラピーの大きな特徴は次の2点である。ひとつはCTを利用した強力な画像誘導機能であり、もう一つは腫瘍の形状に合わせた照射が可能な強度変調放射線治療 (IMRT) を行うことができることである¹⁾。

画像誘導放射線治療

(Image-Guided Radiation Therapy ; IGRT)

放射線治療は、CT、MRIやPETなどの画像情報をもとに、腫瘍の肉眼的大きさや進展範囲を同定したうえで治療の計画が行われている。従来の治療の際には、体表もしくは患者の固定具につけたマーカーを目印に、治療室に設置されたレーザービームとマーカーを照合することで、体内にある病変を体外からねらうシステムが一般的な照射法であった。しかし、臓器の解剖学的位置関係は、消化管のガスや、体重減少、腫瘍の縮小などにより毎日一定の位置を保つとは限らず、照射部位のずれを生じることがある。

トモセラピーは画像撮影の機能としてCT用のディテクターを搭載しており、治療用のビームを利用してmegavoltageのCT (MVCT) を撮影することができる²⁾。毎回の治療ごとにまずMVCT撮影を行い、治療計画時のCTとの重ね合わせ (registration) を行うことで照射位置のずれを修正し、照射を行う。MVCTは軟部の描出能力で診断用のkilovoltageのCT (KVCT) に劣るが、スリットビームを利用した通常のCTの構造と同様の方法で撮影しており、コーンビームCTで見られる散乱線の影響などは小さく、比較的質の高い画像が得られる。また、義歯など医療金属によるアーチファクトが少ないことがひとつの利点とされる。ライナック自体のビームを使用するため、画像取得を別の装置

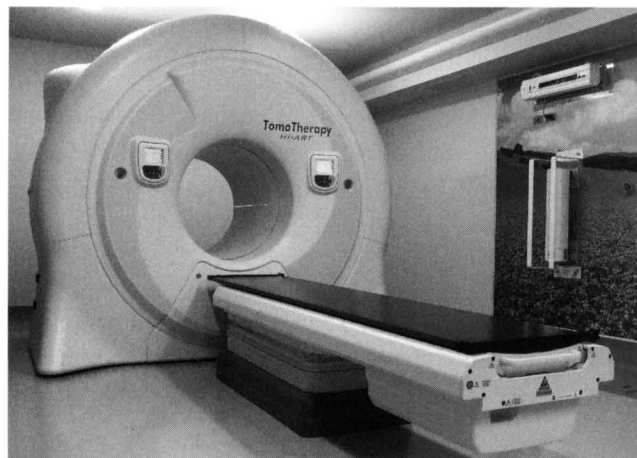


図1. トモセラピーの概観

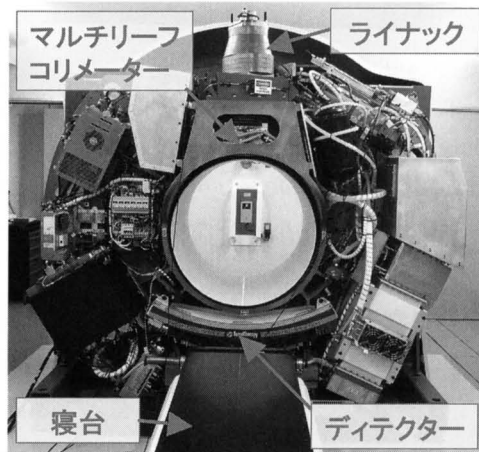


図2. トモセラピーの内部構造

CTのスリッピング上にライナックおよびコリメーターやCT撮影用のディテクターが配置されている。

で行う機器に比べアイソセンター（照射中心）の調整や余分な寝台の移動などが無い点も有用性が高い。画像の重ね合わせは、まず、体輪郭や骨構造をメルクマールとして自動的に行われる。実際の臓器の位置は体の内部でも変動があるため、視覚的に軟部組織の形状・位置を確認しマニュアルで微調整を行う。（図3）例えば、前立腺癌の治療においては体輪郭や骨盤骨の構造だけで重ね合わせをした場合、直腸内のガスの影響などでターゲットである前立腺自体の位置があわない場合があるが、そのような場合にも位置座標を修正のうえ治療を行うことができる。

この治療法は病変に対して正確に照射が行われるだけでなく、日々の腫瘍の形状を観察できるため、放射線治療中に病変の変化が観察された場合に、予定された以外にも容易に照射野を変更することも可能となり、病変に対しては正確であり、また、副作用の軽減にもつながる可能性がある。例えば頭頸部の腫瘍の縮小など形状の変化や体重減少による輪郭の変化、唾液腺の萎縮などに対応できる可能性があり、その有用性が期待されている。トモセラピーの場合、現時点ではMVCT画像による標的の形状変化を踏まえて、新たに別の治療計画を行うことで対応することになるが、MVCT上で治療計画を修正できるプログラムが開発されている（Adaptive radiation therapy；適応放射線治療）³⁾。

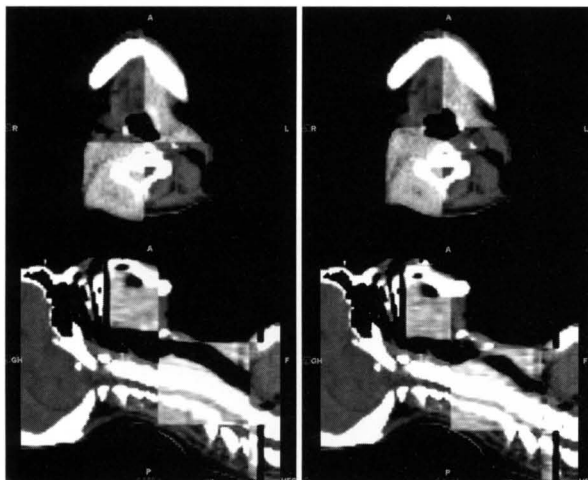


図3. Registrationの様子

治療計画で撮影したCT（灰色）と、治療直前に撮影したMVCTの画像（黄色）

(a) 患者の体表マーカにあわせて撮影したMVCT。輪郭や各構造の位置のずれが見られる。

(b) 重ね合わせ後。ずれが修正されている。重ね合わせた座標情報に基づいて寝台を動かした後に治療を行う。

カラー写真：49-（49）参照

強度変調放射線治療

（Intensity-Modulated Radiation Therapy; IMRT）

強度変調放射線治療とは照射野内の各方向からのビームの強度を変え、逆方向計算により腫瘍の形状に合わせた線量分布を形成する治療法である（詳細は別項を参照のこと）。

トモセラピーではライナックから照射されるX線はプライマリーコリメーターというブロックにより1cm～5cm幅のスライス状のビームとして照射される。このビームはさらに、高圧縮エアで駆動する6mm幅の64枚のブロック（binary MLC）が瞬時に開閉することにより調整される。ライナックが患者の周囲を回転しながら、寝台が進みながら照射されることで、ヘリカルCTと同様に重なりを持った形で照射される。これらの組み合わせによりビームの強度を調節し、病変の形にあわせて照射することができる。回転照射によって柔軟な線量分布がえられることと、照射可能範囲が患者体軸方向で最大160cmという円柱状の大きな体積であることがひとつの特徴である。その照射範囲の広さから、ある程度広い範囲のIMRTが無理なく行える事が利点であると考えている。IMRTの有用性が確認されている頭頸部や、前立腺などの治療が良い適応と考えられる。またトモセラピーのその他の特色として、全脳全脊髄照射や全骨髄照射など長い照射野をいわゆるつなぎ目無く、重要臓器を避けた形で治療できる可能性があり、数施設で実際に行われはじめている。

トモセラピーによる治療の流れ

一般的な治療の流れを示す（図4）。

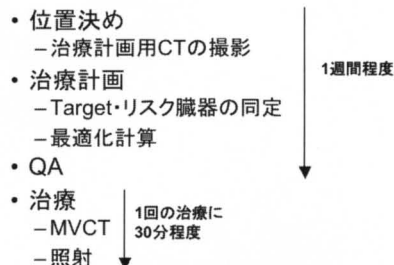


図4. トモセラピーによる治療の流れ

治療計画

治療計画CTは通常のフラット天板の診断用のCTを利用する。シェルなどの固定具を適宜使用する。線量計算では治療ビームが照射されるフィールド幅・変調強度・ピッチ（ガントリー1回転中の寝台の移動距離をフィールド幅で割ったもの）といった基本的な照射条件を設定する。一般的なライナックによるIMRTでは照射方向・門数などを計画者が経験的に指定しなければならないが、トモセラピーではそのような設定は不要である。病変に対する投与線量を設定し、周辺のリスク臓器に対しては臓器ごとに最大線量など制約を指定し、さらにそれぞれの条件の重要性を指定する。トモセラピーでは、最初に入力された固定した条件を目指して最適化していくのではなく、計算を繰り返していくごとに線量分布の変化を確認しながら、上記の条件を変更しながら最適化を行っていく。図5に前立腺癌の治療計画例を示す（図5）。この例では前立腺およびその周辺に十分な線量を投与できている、直腸など周囲のリスク臓器の線量が低下していることがわかる。

品質保証（Quality Assurance ; QA）

各患者の治療前にそれぞれの治療計画ごとにQAを行う。高精度放射線治療の場合、治療計画によって算出された投与線量が、実際確実に照射されるかを事前に確認する作業が必須である。トモセラピー

では治療用の計画を専用のファントム（測定用模擬人体模型）に照射した場合の線量分布を計算するプログラムが内在している。これを利用して、実際に治療用の計画でファントムに照射することで予定した治療が正確に行えるかどうかを事前に確認する。現在のIMRTの問題点であるQAにかかる労力の軽減という意味でQAの手法がある程度確立され、パッケージ化されている点は有利な特徴と考えられる⁴⁾。しかしながら照射法の特徴から日本の線量に関する標準測定法が適用しがたい部分があり、今後の検討が望まれる。

トモセラピーによる照射の実際

前述したように毎回の治療毎にMVCTの撮影を行い、治療計画CT画像と重ね合わせることで位置を修正し、その後実際の照射を行う。

照射は治療部位やフィールド幅やピッチなど計画上のさまざまな要素にもよるが5～15分程度である。セットアップなどを含めると、一人あたり20～30分程度の時間が必要であり、当院ではおおむね一日20人程度治療している。

トモセラピーの欠点

治療計画時の診断用KVCTとMVCTの重ねあわせであるため、軟部の描出状況に差があるため、精度にはある程度限界がある。定位放射線治療（SRT）のような精度を追求するためには、骨構造

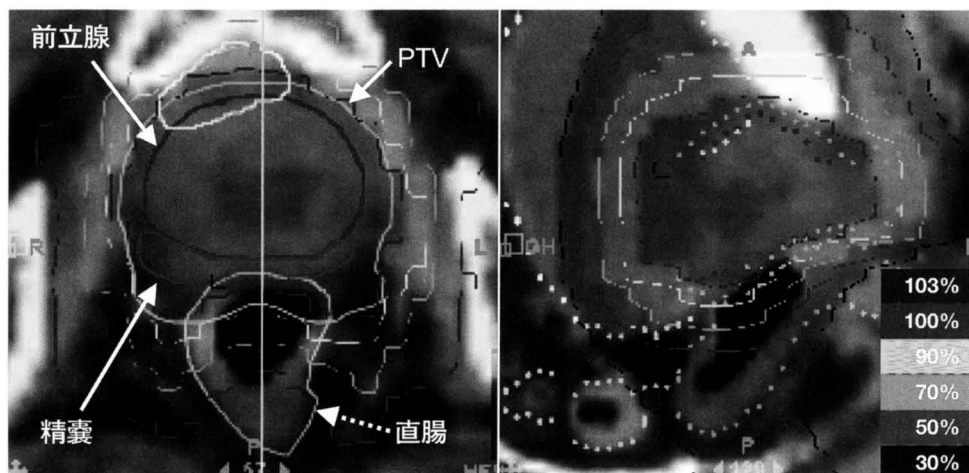


図5. 前立腺癌の治療計画例

前立腺（——→）には均一な高線量が照射される一方、直腸（---→）の線量は抑えられている。

など容易に認識可能なメルクマールがある部位や、金マーカーなどのフィディシャルを使用する必要があると考えられる。

また、ヘリカル走査という照射方法から、治療中の臓器移動の影響を大きく受けることが予想され、呼吸性移動が考えられるような部位の治療には注意が必要である。治療時間の長さなどそのほかの臓器移動に対する注意が必要であることも他のIMRTのモダリティと同様考慮する必要がある。

まとめ

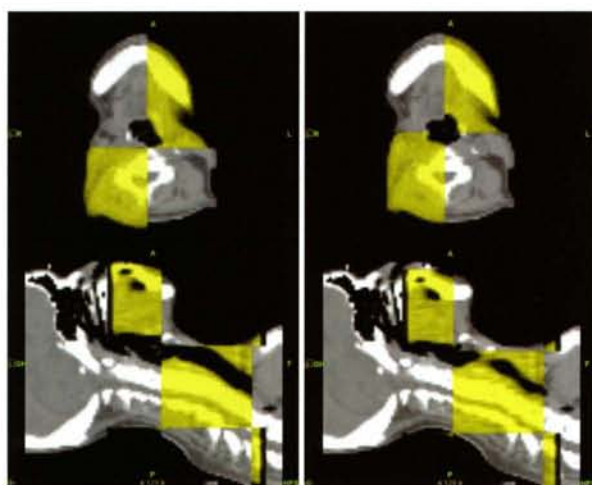
トモセラピーは強力な画像誘導下に柔軟なIMRTを行うことができる。治療計画からQA、位置照合、治療までをパッケージ化し、種々の人為的な手間が省力化されており、今後も検証は必要であるもののその有用性が期待されている。スリッピング上のライナックによるMVCTはこれらを結び付ける鍵となっており、画像と治療を結び付ける理想的な形のひとつとして注目される。

参考文献

1. Mackie TR, Holmes T, Swerdloff S, Reckwerdt P, Deasy JO, Yang J, Paliwal B, Kinsella T: Tomotherapy: a new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy. *Med Phys.* 1993; 20: 1709-1719.
2. Meeks SL, Harmon JF Jr, Langen KM, Willoughby TR, Wagner TH, Kupelian PA: Performance characterization of megavoltage computed tomography imaging on a helical tomotherapy unit. *Med Phys.* 2005; 32: 2673-2681.
3. Langen KM, Meeks SL, Poole DO, Wagner TH, Willoughby TR, Kupelian PA, Ruchala KJ, Haimertl J, Olivera GH: The use of megavoltage CT (MVCT) images for dose recomputations. *Phys Med Biol.* 2005; 50: 4259-4276.
4. Fenwick JD, Tomé WA, Jaradat HA, Hui SK, James JA, Balog JP, DeSouza CN, Lucas DB, Olivera GH, Mackie TR, Paliwal BR: Quality assurance of a helical tomotherapy machine. *Phys Med Biol.* 2004; 49: 2933-2953.

特集 放射線治療計画における画像の役割② トモセラピー

河村 英将、他 (P43~47)



(a)

(b)

図3. Registrationの様子

治療計画で撮影したCT（灰色）と、治療直前に撮影したMVCTの画像（黄色）

(a) 患者の体表マーカースにあわせて撮影したMVCT。輪郭や各構造の位置のずれが見られる。

(b) 重ねあわせ後。ずれが修正されている。重ね合わせた座標情報に基づいて寝台を動かした後に治療を行う。

45-(45)

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