

Title	体幹部腫瘍に対する呼吸同期定位放射線治療装置の開発
Author(s)	原, 竜介; 伊丹, 純; 有賀, 隆 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 2002, 62(4), p. 156-160
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/17035
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

体幹部腫瘍に対する呼吸同期定位放射線治療装置の開発

原 竜介¹⁾ 伊丹 純¹⁾ 有賀 隆¹⁾ 小塚 拓洋¹⁾
山下 英臣¹⁾ 阿部 容久¹⁾ 布施 雅史¹⁾ 近藤 達也²⁾
篠原 大³⁾ 長岡 孝行³⁾ 古曳 孝明³⁾

1) 国立国際医療センター放射線治療部, 2) 同脳神経外科
3) 日立メディコ技術研究所

Development of Stereotactic Irradiation System of Body Tumors under Respiratory Gating

Ryusuke Hara¹⁾, Jun Itami¹⁾, Takashi Aruga¹⁾,
Takuyo Kozuka¹⁾, Hideomi Yamashita¹⁾,
Yoshihisa Abe¹⁾, Masashi Fuse¹⁾, Tatsuya Kondo²⁾,
Dai Shinohara³⁾, Takayuki Nagaoka³⁾
and Takaaki Kobiki³⁾

Stereotactic radiosurgery for body tumors is hampered by the difficulties in body fixation and respiratory motions of the tumor. We have developed a Microtron-based system for the stereotactic irradiation of body tumors, which delivers radiation at a predetermined respiratory phase.

The patients are fixed non-invasively in the custom-made bed, and CT images are obtained. The isocenter is calculated with reference to those images and is marked onto the patient's skin and the custom-made bed. The patient lying on the bed is transferred to the treatment couch of the Microtron. After reproducing the isocenter, actual treatment is started. The treatment couch as well as the gantry move automatically around the isocenter according to the treatment planning. The circular collimator moves by computer control to reduce geometrical errors to less than 0.5mm, which is evoked by gantry movement. Respiratory movement of the abdominal wall is measured by laser displacement monitor. The Microtron delivers X-rays at a predetermined respiratory phase with a lag time of 20 msec after the on-signal from the monitor.

Research Code No.: 60

Key words: Stereotactic radiation therapy, Body tumor,
Respiratory gating

Received Sep. 3, 2001; revision accepted Feb. 18, 2002

- 1) Department of Radiation Therapy and oncology
- 2) Department of Neurosurgery, International Medical Center of Japan
- 3) Hitachi Medical Corporation Research and Development Center

別刷請求先
〒162-8655 東京都新宿区戸山1-21-1
国立国際医療センター放射線治療部
原 竜介

はじめに

近年、頭蓋内腫瘍に対するガンマナイフあるいは超高圧X線発生装置を用いた定位的放射線治療の臨床応用が進みつつある。頭蓋を侵襲的もしくは非侵襲的に固定して標的 (clinical target volume, CTV) の位置的精度を確保し narrow beam をCTVに3次元的に集中させることにより従来では考えられなかった一回大線量照射が可能となった。定位的放射線治療は、聴神経腫瘍や転移性脳腫瘍の治療において大きな効果を発揮している^{1), 2)}。

一方、体幹部腫瘍の定位的放射線治療は体幹の固定の困難さと腫瘍の呼吸性移動のため、従来一般的には施行されていなかった。われわれは、マイクロトロンを基本とした体幹部腫瘍に対しても応用可能な定位放射線治療装置を開発したのでその概要を報告する。

開発したシステムと治療方法の概要

1. 定位放射線治療装置

定位放射線治療装置は、治療計画装置、定位放射線治療用制御システム、照射コリメータ装置、治療台(カウチ)、呼吸同期システムなどがマイクロトロンシステムに追加されて構成される。マイクロトロンシステムは、マイクロトロン制御ユニット、高エネルギー電子ビームを発生するマイクロトロン本体、高エネルギー電子ビームを搬送するビームトランスポート系、高エネルギー電子ビームをX線ビームに変換しビーム照射野を決定する照射ヘッドを内蔵する治療用ガントリ、操作卓により構成される (Fig. 1)。

1) 治療計画装置

治療計画装置はコンピュータSun ultra 5を基本に構成され、X線CT装置との画像データ通信にはDR11-Wを使用した。さらに、放射線治療計画装置FOCUS (Computed Medical Systems, USA)を併用した。

①線量分布計算のソフトウェア

計算線量分布法は第一世代のアルゴリズムを用いてTPR (tissue peak ratio)法を適用している。TPR法はX線CT画像

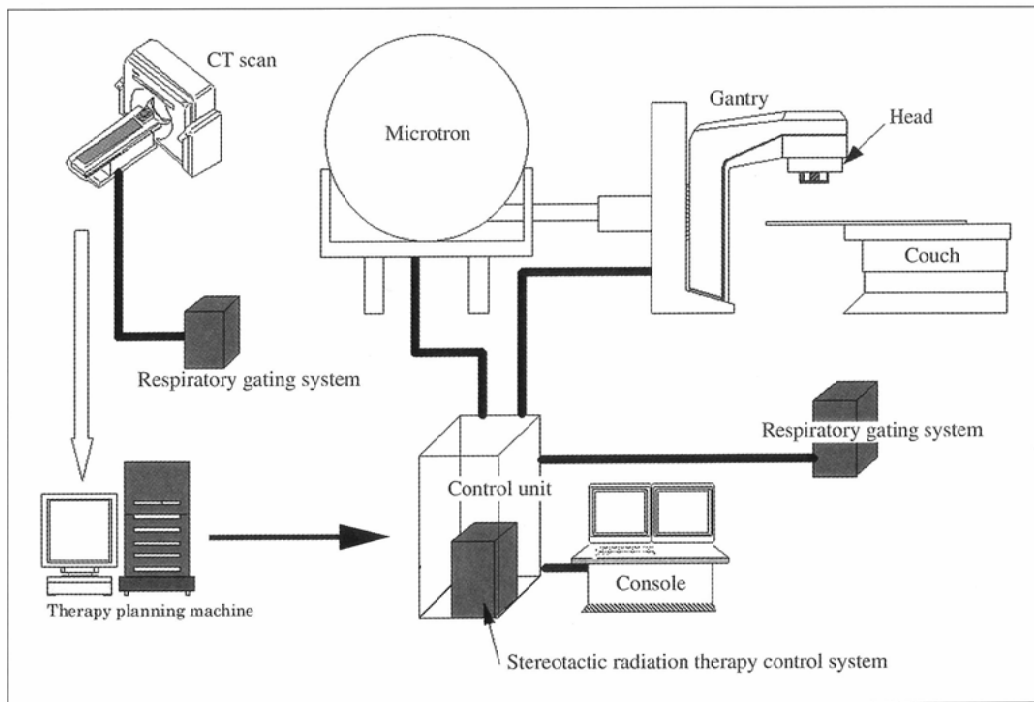


Fig. 1 Stereotactic radiotherapy system

を用いて人体内のある点にビームが到達するまでに通過する水等価距離(実効距離)と、その点における照射野の大きさを変数として水ファントムで測定した組織/ピーク線量比表より、その点の線量を求める方法である。側方への線量の減衰計算にはコリメータの半影を考慮した関数を利用した。TPR法では実効距離の計算に時間がかかるので、アルゴリズム通りの通常モードのほかに実効距離を近似積分する方法で高速化する高速モードも開発した。

②治療計画最適化のソフトウェア

定位的放射線治療では腫瘍には線量が集中し、周囲の正常組織の線量は均等に低くなるように3次元空間の複数の照射方向からアイソセントリックにX線を照射する。しかし、従来の治療計画では入射線束の3次元的位置関係を把握するのが困難な場合が多かった。そこで、照射方向を決定するために支援アルゴリズムを考案し、プログラムを開発した。アイソセンターを中心にして周囲の耐容線量決定臓器を頭頂が極となる球面に投影し、それを腹の上方より見た2次元平面へ展開する方式(照射マップ)を考案した³⁾。

2)照射コリメータ装置

今回、ガントリの撓みに対しても位置精度を確保する手段として照射方向を制御できる照射コリメータを開発した。照射方向にあるガントリの撓みをあらかじめ計測し、コリメータの入力端の照準をX線源に保ちつつ、出力端からは常にアイソセンターを中心として照射するように照射コリメータ装置の円形コリメータを自動制御した。円形コリメータは50%isodose lineにて規定されており、直径5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50mmを選択することができ

る。照射コリメータ装置の照射方向制御には2次元位置制御機構とコリメータの揺動機構を設けた。

3)治療台(カウチ)

定位放射線治療装置におけるカウチの主要な機能は、従来の治療台機能のほかに患者を寝載した寝台の移動によりアイソセンターの再現ができること、治療時に寝台の回転角度を治療計画で設定された角度に設定できること、立案された治療計画に基づき自動的に寝台回転が行われることであるとした。さらにガントリと合わせてその位置的精度が1mm以内になるものとした。

4)呼吸同期システム

呼吸同期システムは、呼吸信号を検出するセンサー、センサー信号の増幅器、呼吸同期信号発生レベル設定ソフトウェア、CRT波形モニターより構成される。呼吸信号の検出センサーとしてTada⁴⁾らの考案した方法を採用し、レーザー変位計を用いた。レーザー変位計は患者の体に接触することなく、腹壁または胸壁の呼吸運動を読み取ることが可能である。変位計から得られた呼吸信号は増幅機により増幅される。そしてレベル設定ソフトウェアにより設定した波形の任意の位相で定位放射線治療装置に照射オンオフの信号が送られる。治療装置は信号に従い自動的にビームをオンオフする。マイクロトロンシステムでは、照射開始後わずか20m秒で最大線量率に達する。また照射中に患者の呼吸が乱れた場合、呼吸同期システムより治療停止信号が送られ照射が直ちに停止するよう設定されている。

呼吸同期システムの精度を確認するため、胸部動態ファ

ントムを用いて、以下のような照射実験を行った。呼吸運動を模擬して往復運動する横隔膜、肺胸郭で構成されたファントムの模擬肺内部にタングステン球(直径4mm)を配置した。往復運動するタングステン球が折り返す点(終末呼吸相)をアイソセンターに位置決めをした。胸郭動態ファントムの胸壁の動きをレーザー変位計で検出し、呼吸同期システムで呼吸同期信号を作成、照射実験を行った。カウチ回転角度とガントリ回転角を組み合わせた設定条件は、(0度, 0度), (0度, 330度), (30度, 330度)(30度, 20度)とした。

2. 実際の治療方法

まず、患者ごとに可塑性樹脂で固定ベッド(モールドケア, アルケア社, 日本)を作成し、治療中の動きを抑え、また体位の再現性を確保した。患者をこのベッドに仰臥させ、ベッドごとCT(日立メディコ製CT-W2000)撮像を行う。撮像範囲内のある1点を基準点として、ベッドの左右、患者の体表にマーキングを施す。またベッドの頭側端にCT撮影時の中心軸線のマーキングをしておく。3次元集光照射を施行するためには腫瘍の頭尾それぞれ40cm程度のCT撮像が必要である。腫瘍周辺部はアイソセンターの位置決め精度を確保するためスライス厚2mm, スライス間隔2mmで撮像する。その周辺部はスライス厚10mm, スライス間隔10mmで撮像する。これらはいずれも終末呼吸時に撮像される。上記のすべてのCT情報は治療計画装置に転送されて治療計画が行われる。治療計画は、終末呼吸時画像を用いて行われる。その間、患者は一度ベッドからおりて待つこととなる。治療計画装置上では、体輪郭は自動抽出されるが、腫瘍やリスク臓器はマウスを使用して入力する。その後、腫瘍重心が照射のアイソセンターとして計算され、照射マップが自動的にリスク臓器に描出される。この照射マップ上で、リスク臓器を避け、かつ衝突が起こらない範囲で線束入射方向が自動的に設定される。体幹部腫瘍に対しては終末呼吸時での間欠照射を行うために多門照射を採用し、通常では10門以上の3次元多門集光照射となるように入射線束を設定している。次に、各線束ごとの線量割り振りを決定する。現状では、各線束ごとに均等割り振りを行い、治療計画装置FOCUSを併用しつつ、線量分布を見ながら割り振りを変更している。線束入射方向と割り振り線量が決定された後に線量分布が3次元的に計算され、DVHの表示も可能である。これらの結果を見て臨床的に満足すべきものであれば、照射スクリプトとして治療制御装置に転送する。修正する点があれば照射マップに戻って線束入射方向と線量割り振りを再計算することとなる。次に実際の治療に移行する。治療開始直前に患者は再び固定ベッドに固定される。その際、固定ベッドごと再びCT撮像を行い、治療計画時に撮像されたCT画像と比較して皮膚マーカの位置と照射アイソセンターの位置の相互関係のズレを記録する。その後ベッドごとマイクロトロンのカウチに移送され、皮膚マーカを基準点としてx, y, z方向にカウチ

を動かしアイソセンターをマイクロトロン回転中心と合致させる。この際、照合CTで確認されたズレを修正する。カウチの位置設定精度は $\pm 0.5\text{mm}$ 以内であるため非常に正確にアイソセンターを再現することが可能である。その後照射スクリプトに従ってカウチおよびガントリの模擬運動が行われ衝突が起こらないことを確認し、実際の治療が開始される(Fig. 2)。制御ユニットは、作成された照射スクリプトに従ってマイクロトロンガントリおよびカウチの自動運動を制御し、実際の治療を行う。呼吸モニターには、前述のごとくレーザー変位計を用いた。レーザー変位計からの呼吸信号は呼吸同期装置で処理され、臓器静止呼吸位相でマイクロトロンに照射オンの信号が送られる。ある線束入射方向の照射が終了するとガントリおよびカウチは自動的に次の線束入射方向に回転移動し、その方向からの治療が遂行される。

固定ベッド(モールドケア)を用いて患者を固定し、CT画像によって計測したアイソセンター座標を用いて定位放射線治療を行う際の位置的精度を調査するため、寒天ファントムを用いた以下のような実験を行った。初めに、寒天ファントムを製作する。でき上がった円柱状寒天(幅20cm程度, 長さ30cm程度)を頭尾方向に2つに切離し、切断面の中央部に直径3mm金属球(内径1mm)を埋め込みアイソセンターとする。寒天ファントムをラップに包みモールドケアで固定ベッドを作成する。ファントムを固定ベッドに固定したうえで、CT撮影を行う。まず、任意の点を原点としてモールドケアの左右と頭側にレーザーポインターを参考としてマーキングする。そしてスライス厚2mmにて、アイソセンターの鉄球を撮像し、原点を(0, 0, 0)としたアイソセンターの(x, y, z)座標を算出する。そして、固定ベッドに固定したままマイクロトロンのカウチ上へ移送する。カウチ上で、原点を座標(0, 0, 0)とし、CTで計測されたアイソセンターの座標通りx, y, z各方向にカウチを移動させる。こうして、カウチ上で再現された治療時のアイソセンターと鉄球の中心とのズレを各方向に計測する。以上の実験を計10回行った。

結 果

1.

- 1) 照射マップをFig. 3に示す。太い青線に挟まれた領域がCT画像撮影範囲であり、赤く表示されている部位がリスク臓器を表す。複数の放物線軌道は各カウチ角度(0, 30, 60, 90, 300, 330度)におけるガントリ角度による変化を示す。ここで、細い青線に囲まれた領域がガントリとカウチの衝突がない範囲(可動範囲)であり、×印(可動範囲内で自由に設定可能)で示された入射方向より照射することになる。この照射マップによりリスク臓器を避け、かつカウチとガントリ衝突がない方向からの入射線束の設定が2次元的に容易に把握可能となった。
- 2) ガントリの位置精度は、 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内となった。



Fig. 2 Actual treatment
Gantry head (arrow)
Laser displacement monitor (arrow head)
Age 67, male

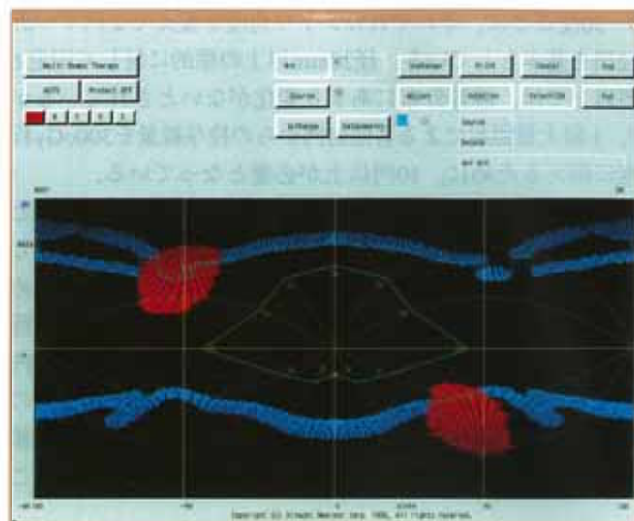


Fig. 3 Irradiation map
The inside of the blue line shows the rotation range of couch and gantry. The red part shows risk organ.

- 3) カウチ動作の位置的精度は前後、左右、上下と $\pm 0.5\text{mm}$ であり、回転動作は角度精度 ± 0.5 度が得られた。また前後、左右動作におけるアイソセンター上での天板の撓みは135kgの加重を負荷したとき、2mm以下であった。
- 4) 胸郭動態ファントムを用いた呼吸同期照射実験の結果、全例においてX線ビーム位置モニターで観測されたX線透過像で、円形照射野のほぼ中心点がタングステン球の像内に位置していた。呼吸同期システムを用いて往復運動するタングステン球位置に各方向 $\pm 2\text{mm}$ の精度で呼吸同期照射が行えることが確認された。

2.

モールドケアを用いた位置精度確認実験を計10回行った結果、カウチ上で再現されたアイソセンターと鉄球の中心ズレは、左右方向0~2mm(平均0.8mm)、頭尾側方向0~2mm(平均1.1mm)、背腹方向0~3mm(平均1.9mm)、全体で2.0~3.6mm(平均2.8mm)であった。

この実験にてカウチ上での位置的誤差は、各方向に3mm以内、全体でも4mm以内であることが確認された。またこれまで実際に治療を行ってきた23症例において、治療計画CTと治療前位置照合CTでの、アイソセンターの位置誤差は、Table 1に示したとおり、左右、背腹、頭尾方向全体で平均4.2mmと比較的良好であった。

考 察

今回のわれわれの方法では、その固定方法においてLaxらや、Herfarthらのように軸指標の付いた固定フレームを用いず、モールドケアより作った固定ベッドを採用している^{5),6)}。フレームによる固定に比べて、簡便でありかつ患者の負担は少ないものと考えられる。基準点の再現は、患者体表のマークと固定ベッド左右マークをCT、もしくは治療寝

Table Set up error

	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Median (mm)
Lateral	0	6	1.7
Vertical	0	6	1.5
Longituinal	0	8	2.0
Vectorial	1	8.3	4.2

台のポインターに合わせることで行っている。照合CTによる位置修正後の位置誤差は前述の実験の通り、平均2.8mmであった。現在われわれは、腫瘍辺縁に対して5mmのマージンを取ってCTVとしている。

腫瘍の呼吸性移動に対しては、Tadaら⁴⁾や、Oharaら⁸⁾のように臓器停止位置で照射する方法を用いている。Laxらや、Herfarthらは呼吸同期法は用いず、腹部圧迫法による呼吸運動抑制を用いている^{5),6)}。しかし圧迫の場所や程度によっては、腫瘍位置が異なってしまう可能性もある。われわれは呼吸モニターとして、レーザー変位計を用いている。これは患者の皮膚に接触することなく患者の腹壁運動を観察できる利点がある。また、マイクロトンシステムは、ビームオン信号後約20m秒で最大線量率を得ることが可能であり、呼吸同期間欠照射を有効に実施することができる。さらに現在深呼吸、浅呼吸の二相で腫瘍を撮像し、2つの腫瘍像を合成してGTVとし治療計画を行っている。これに呼吸同期照射を組み合わせ治療精度の向上を図っている。

現在、われわれは体幹部腫瘍に対する定位的放射線治療1回大量照射を基本としている。その投与線量はGTVの最小線量を基準としている。GTV最小線量/GTV最大線量は80%以上となるようにしている。照射門数は、各カウチ角度

0~30度ごとに、それぞれガントリ角度を変えて2門ずつ計12門を基本としている。径20mm以上の標的に対して固定6門以上では、線量分布にあまり変化がないとされているが⁹⁾、1回大量照射による各照射門からの投与線量を300cGy程度に抑えるために、10門以上が必要となっている。

現在、投与線量は肝腫瘍でGTVの最小線量として20Gyとしており、肺腫瘍では重篤な有害事象がないことを確認しながら線量を30Gyまで増加させ、良好な局所制御率を認めている¹⁰⁾。しかしながら3次元集光照射といえどもある程度の正常組織の被曝は避けられず、腸管に近接した腹腔内腫瘍や食道、大血管に近接した肺腫瘍など1回大量照射の困難な病変も存在する。分割照射の導入により、1回照射線量を低減させることで正常組織の慢性障害発生を減らすこ

とができ、これらの病変を治療することが可能となる。Blomgren, Laxらは、固定具で体幹を固定し、体幹部腫瘍に対して辺縁線量1回15Gyで1~3回照射を行っており、またUematsuらは肺腫瘍に対し、CTとLinacで寝台を共有する装置(FOCAL unit)を用いて、中心線量1回5~10Gy(PTVは80%線量域内)総線量50~60Gyを投与し、それぞれ良好な局所制御率を報告している^{7), 11)}。分割照射法を導入するために、体位再現性の確保が重要であり、さらなる固定具の改良やその再現性確認法の開発が必須である。

謝 辞

この研究は、厚生労働省班研究伊丹班「全身用定位的放射線治療装置の開発とその適正線量の研究」の一環として行われた。

文 献

- 1) Linskey ME, Lunsford LD, Flickinger JC, et al: Stereotactic radiosurgery for acoustic tumors, *Neurosurg Clin N Am* 3: 191-205, 1992
- 2) Flickinger JC, Kondziolka D, Lunsford LD, et al: A multiinstitutional of experience with stereotactic radiosurgery for solitary brain metastasis. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 28: 797-802, 1994
- 3) 伊丹 純, 篠原 大, 長岡孝行, 他: 3次元集光照射の線束入射方向の簡便な表示法について—照射マップの考案. *日本医放会誌* 58: 761-763, 1998
- 4) Tada T, Minakuchi K, Fujioka T, et al: Lung cancer: intermittent irradiation synchronized with respiratory motion—results of a pilot study. *Radiology* 207: 779-783, 1998
- 5) Lax I, Blomgren H, Naslund I, et al: Stereotactic radiotherapy of malignancies in the abdomen. *Acta Oncol* 33: 677-683, 1994
- 6) Herfarth K, Debus J, Lohr F, et al: Stereotactic extracranial stereotactic radiation therapy: set-up accuracy of patients treated for liver metastases. *J Clin Oncol* 19: 164-170, 2001
- 7) Blomgren H, Lax I, Goevanson H, et al: Radiosurgery for tumors in the body: Clinical experience using a new method. *J Radiosurg* 1: 63-74, 1998
- 8) Ohara K, Okumura T, Akisada, et al: Irradiation synchronized with respiration gate. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 17: 853-857, 1989
- 9) Graham JD, Nahum AE, Brada M: A comparison of techniques for stereotactic radiotherapy by linear accelerator based on 3-dimensional dose distributions. *Radiother Oncol* 22: 29-35, 1991
- 10) Hara R, Itami J, Kondo T, et al: Stereotactic single high dose irradiation of lung tumors under respiratory gating. *Radiother Oncol* (submitted)
- 11) Uematsu M, Shioda A, Tahara K, et al: Focal, high dose, and fractionated modified stereotactic radiation therapy for lung carcinoma patients: A preliminary experience. *Cancer* 82: 1062-1070, 1998