

| | |
|--------------|---|
| Title | 呼吸位相同調放射線照射法に関する研究 |
| Author(s) | 大原, 潔; 久保田, 進; 秋貞, 雅祥 他 |
| Citation | 日本医学放射線学会雑誌. 1987, 47(3), p. 488-496 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/17820 |
| rights | |
| Note | |

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

呼吸位相同調放射線照射法に関する研究

筑波大学臨床医学系放射線科

大原 潔 久保田 進 秋貞 雅祥

筑波大学粒子線医科学センター

稲田 哲雄 北川 俊夫

筑波大学附属病院放射線科

奥村 敏之 久礼 文雄

（昭和61年12月1日受付特別掲載）

（昭和62年1月9日最終原稿受付）

Irradiation Synchronized with Respiratory Cycle

Kiyoshi Ohara¹⁾, Susumu Kubota¹⁾, Masayoshi Akisada^{1,3)}, Tetsuo Inada²⁾
Toshio Kitagawa²⁾, Toshiyuki Okumura³⁾ and Fumio Kure³⁾

¹⁾Department of Radiology, Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba

²⁾Particle Radiation Medical Science Center, University of Tsukuba

³⁾Department of Radiology, Tsukuba University Hospital

Research Code No. : 601

Key Words : Respiratory movement, Synchronization, Irradiation technique

The authors devised an irradiation technique to synchronize with respiration. The synchronization equipment was designed to quantify the respiration curve using a microcomputer and to set the gate level on the curve arbitrarily. The operation of the linear accelerator was controlled by the gate signal triggering the microwave oscillator. The ventilation, and the pressure of the thorax or of the upper abdomen were employed as sources of information about respiration in the phantom study and in clinical use respectively.

The efficacy of the synchronization was examined with gated simulator and with verification films. This technique was considered to be useful in precise radiotherapy for peridiaphragmatic mobile tumors.

はじめに

放射線外部照射においては、照射中の病巣の動きは照射精度を著しく低下させる要因の一つとなる。病巣の動きの成因には患者の体動、消化管蠕動などのほかに心拍動や呼吸運動がある。これらのうち毎回の照射時に不可避でありかつその動きの程度が大きいものは呼吸運動であると考えられる。

肺、食道、胃、肝、脾など呼吸運動の影響を被る臓器の病巣に対する照射計画に際しては、日常その呼吸性移動範囲をも見込んだ広目の照射野が設定されることが多い。しかし呼吸運動は周期的反復運動であることから、呼吸位相に基づいて病

巣の運動位相をとらえ同調照射を行うならば、病巣により限局した照射野を設定することが可能になり、照射精度の向上が期待できると考えられる。

本研究の目的は呼吸位相に同調させた照射法を研究開発することである。

方法並びに装置

I. 原理

反復する呼吸周期位相と、往復運動を行う病巣の位置との関係を把握し、病巣を再現性良好な位置において呼吸位相同調間欠照射を行うことである。

本研究では、呼吸位相を表徴するいくつかの呼吸情報のうちから、換気量及び胸・腹圧を情報源

として採用した。その理由は、前者はファントム実験に適していると考えられ、後者は臨床適用上装着が簡便でかつ患者の不快感が軽微であると考えたためである。

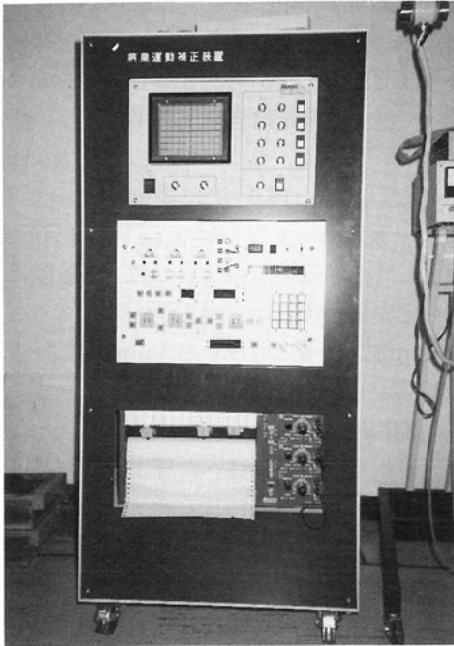


Fig. 1 The Respiratory Synchronization Equipment (Anzai Sogyo Co., Ltd.)

II. 装置 (Fig. 1, 2)

考案試作した呼吸位相同調装置は以下に示す機能を具備したものである。

1. 呼吸情報の検出, 増幅
 - A. 換気量 (ラミナ, 差圧計)
 - B. 胸腹圧 (エアバッグ・ストレインゲージ)
 - C. その他 (インピーダンス, サーミスタなど)

2. 呼吸情報処理 (CPU)

波形表示・数量化

3. Gating 機構

呼吸周期波上の任意の位置での Gate の開・閉の設定, 信号化表示

4. 記録・記憶

呼吸周期波及び Gate 信号の記録並びに記憶

5. 体動検出装置の併用 (附)

レーザーとその反射紙を使用 (Gammex 社 Patient Alignment System)

III. 照射装置の制御

呼吸位相同調装置 (以下同調装置と略す) からの Gate 信号を用いてライナック (ML-15 MDX) のマイクロ波発振器を制御し放射線照射を行う。すなわちあらかじめ設定した呼吸位相にある場合に限り発振器が作動し, 間欠的照射がなされる。同様に X線シミュレータに導入されるパルス状

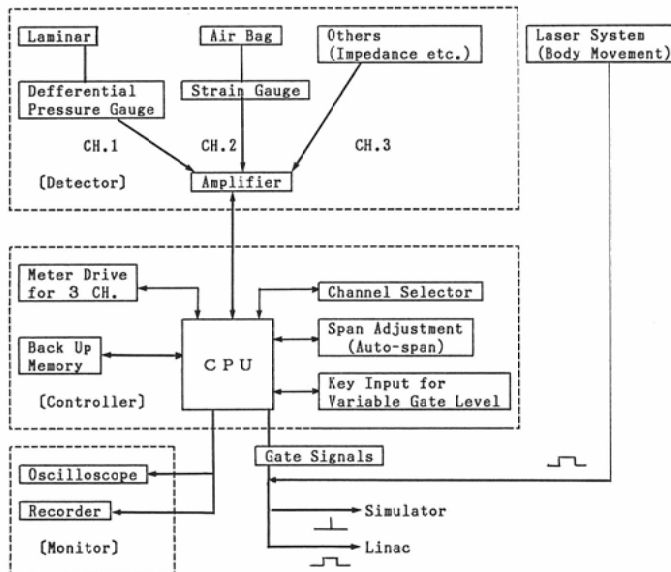


Fig. 2 Block diagram of the Respiratory Synchronization Equipment



Fig. 3 The phantom designed for this study
(Kyoto Kagaku Hyohon Co., Ltd.)

Gate 信号により位置決め撮影がなされる。

IV. 基礎実験

本研究目的にかなうファントムを作製し、その換気量を基にした Gate 信号を用いシミュレータ X 線撮影並びにライナック 6MVX 線照射を行った。

1. ファントム (Fig. 3)

試作した胸部ファントムは以下のようなものである。材料は X 線学的に等価なように骨格には人骨を、胸壁、縦隔、横隔膜 (板) などの軟部組織にはウレタン樹脂を用い、肺は中空とした。モーターにより横隔膜を往復運動させ、左右主気管支、気管を通じて換気が行われるように設計した。直径 2cm の軟部組織等価球を肺腫瘍にみため、横隔膜と肺尖後部間を結ぶゴム紐で支持し、右下肺野に位置させた。

1 回換気量は 0.65l で腫瘍の頭尾方向移動距離は約 1.5cm である。すなわち成人の安静呼吸状態に相当するものである。

2. 方法

A. シミュレーター撮影

X 線二重曝射撮影を行って換気量と腫瘍の動きの程度との関係を求めた。

ファントムの呼吸数は 12 回/分、X 線曝射時間は 0.05 秒以下とした。

B. ライナックグラフィ

本照射法の実効性を確認するためにライナックグラフィを行った。フィルムは低感度ノンスク

リーン X 線フィルム (コダック XV-2) を用いた。照射条件は、6MVX 線、照射野 6×6cm、線量率 1.3 Gy/分で、ファントムを背臥位とし isocenter において 1Gy を腹背方向に照射した。腫瘍の位置に関して、吸気終期静止状態、呼気終期静止状態、及び呼吸運動時で Gate 信号を導入した場合、導入しなかった場合の 4 つの条件下で照射を行った。

得られたライナックグラムからデンシトメトリを行って濃度曲線を描き、照射中の腫瘍の動きの有無を解析した。装置は Sakura Isodensity Recorder (小西六, PDI 10) に周波数発振器 (Trio, AG 203) 及びペンレコーダ (YEW, Type 3066) を併用して、頭尾方向の任意の線上の濃度について一次元表示を行った。走査条件は、アパーチャ面積 1mm ϕ 、走査ピッチ 0.625mm で拡散濃度法により測定した。

V. 臨床適用

臨床適用には、既に述べた理由からエアークラッシュ (マンジェット型) による胸・腹圧の変化を呼吸情報として採用することにした。

1. 換気量と胸・腹圧との関連

まず換気量及び胸・腹圧によって示される呼吸曲線の互換性について検討した。健康人ボランティア (医学生) 15 人を対象とした。

被験者をシミュレーター撮影台上に仰臥させ、胸部または上腹部に装着したエアークラッシュを不快感がない程度に加圧した。同時にラミナに連結したマスクを鼻と口を被うように装着した。安静呼吸状態において換気量及び胸・腹圧の波高を調整した後、深呼吸、不規則呼吸、咳嗽なども試行した。

得られた呼吸位相曲線をもとに、位相のずれ、波形及び波高の安定性、再現性及び Gate の作動などについて比較検討した。

2. シミュレーター撮影

本装置を 11 症例に適用し X 線撮影を行った。その内訳は、肺野腫瘍影を示す 3 例、リビオドール塞栓の行われた肝腫瘍 3 例、下部食道癌 2 例、腫瘍切除端に金属クリップが留置された肝門部胆管癌 1 例、Moving Strip 照射で横隔腹部を含む 2 例であった。

シミュレーター X 線透視下に Target Volume が

静止した状態あるいは許容しうる程度の動きであるように Gate のレベルを設定した。この Gate 信号を用いてシミュレータ撮影を行い、Target Volume の動きと照射野の適正を検討した。

3. ライナック X線照射

実際の放射線治療に同調装置を用いた症例はライナックグラムで病巣を確認しうる 4 例であった。すなわち肺野腫瘍症例 2 例と肺野の一部を含む際の Moving Strip 照射 2 例である。基礎実験と同様にしてライナックグラムを撮影解析した。

2 例についてはレーザーによる体動検出装置も併用した。本装置は、特殊な反射紙によって入射と同一方向へ反射されるレーザー点状光を感知する機能を有するものである。すなわち体表面に貼布した反射紙が体動によりレーザー光から外れると Gate がかかる仕組になっており、その検出精度は用いる反射紙の大きさに依存する。反射紙は照射中心を通る矢状線上の胸・腹部体表に貼布し、レーザー点状光を微走査し矢状方向尾側から俯角約 30° で照準した。

結 果

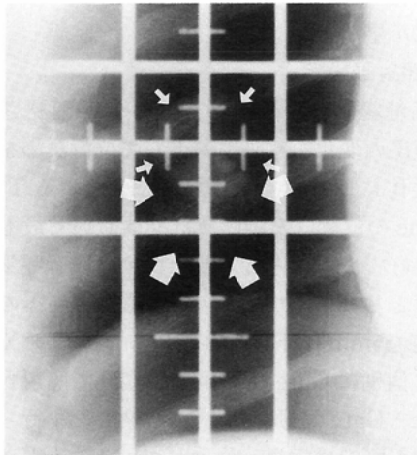
I. 基礎実験

1. シミュレータ撮影 (Fig. 4)

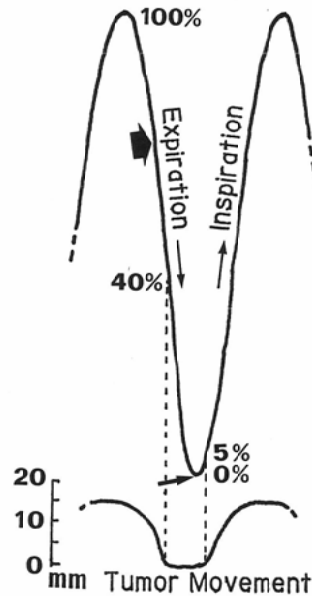
ファントムの換気量曲線と腫瘍の移動距離との関係を Fig. 4B に示した。換気量曲線において最大呼気時（呼気終了時）が 0、最大吸気時が 100 (0.65l) となるように Span を調整し、曲線の高さを百分率で表示した。呼気相及び吸気相における任意量の吸気時と最大呼気時とで二重曝射を行った結果、本ファントムでは呼気相 40% から呼気終期を経て吸気相 5% までの位相においては腫瘍が静止状態にあることが明らかになった。

2. ライナックグラム (Fig. 5)

上記結果をもとに Gate の開閉レベルをそれぞれ呼気相 35%、吸気相 2% に設定し、呼吸位相同調を行った。得られたライナックグラムはコントラストが低い、非同調照射では移動のため腫瘍が楕円形を呈しているのに対し、同調照射では呼吸状態で静止している様子がうかがえた (Fig. 5A)。



4A



4B

Fig. 4 Ventilation and tumor movement in the phantom. A; A sample of simulator X-ray film exposed both at the end of expiration (small arrows) and at a point in the expiratory phase (70% of the tidal volume, large arrows). B; Tumor movement corresponding to the ventilation curve.

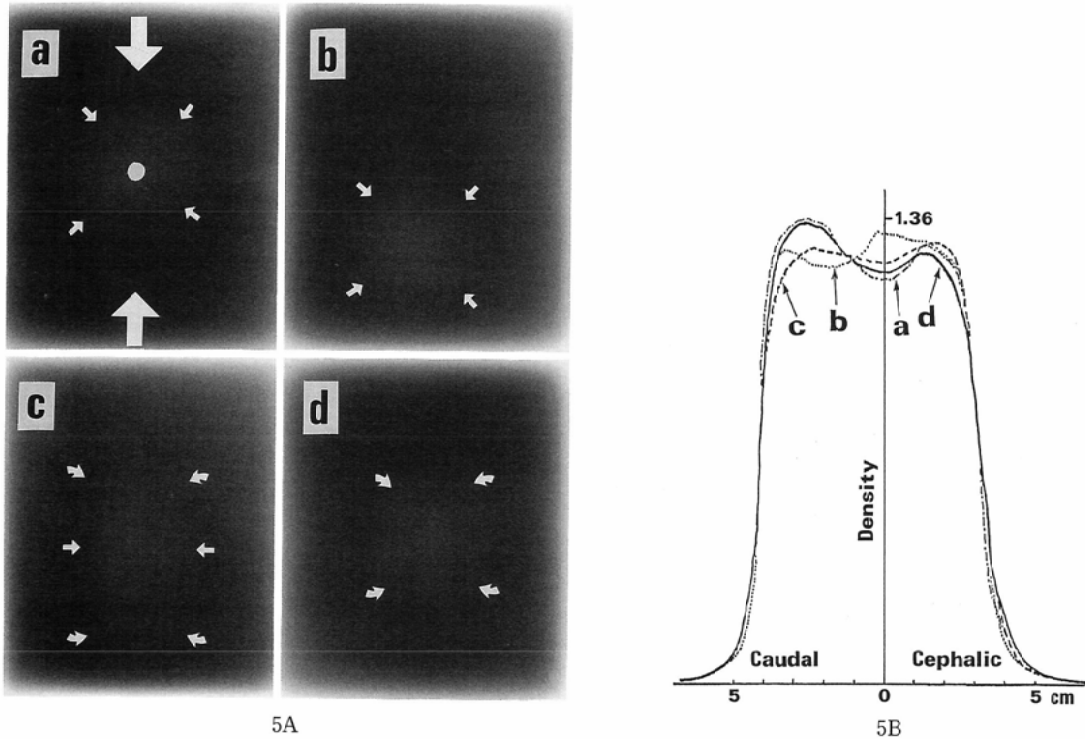


Fig. 5 Verification films and their densitograms of the phantom tumor obtained in 4 situations. A: Verification films, a; static tumor at the end of expiration, b; static tumor at the end of inspiration, c; during respiration without synchronization, d; with synchronization. Small arrows indicate the tumor and large arrows show the level of densitometry. The white point indicates the standard point in the tumor location in densitometry. B: Densitograms

これらのライナックグラムを濃度曲線で示した (Fig. 5B). 同調照射では呼気停止照射に近似した曲線が得られた。

II. 臨床応用

1. 換気量と胸・腹圧の関係

鼻・口腔マスク並びに胸部または腹部にエアバッグを装着し、呼吸の安定を待って Span 調整を行った。Auto-Span 機構を用い連続 8 呼吸周期高の平均値を 100% として調整した。胸腔または腹圧曲線と換気量曲線とをペンレコーダで同時に記録したグラフから以下の結果を得た。

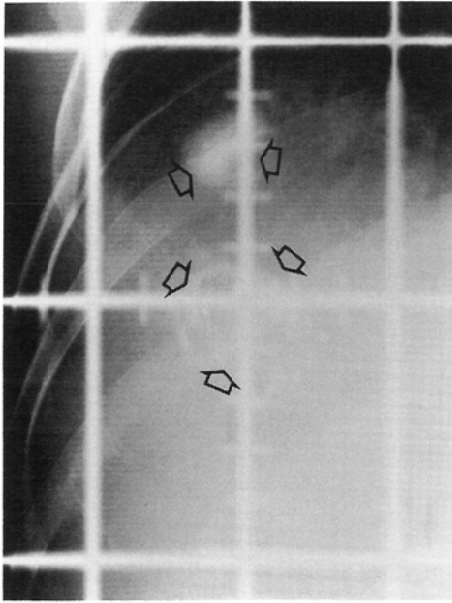
- 1) これらの曲線は相似サインカーブを呈した。
- 2) 胸圧曲線と腹圧曲線との間には位相時間差が認められなかった。
- 3) 胸・腹圧曲線と換気量曲線には個人により一定の位相時間差がみられ、前者の方が 0.1 から 0.2

秒位相が早かった。

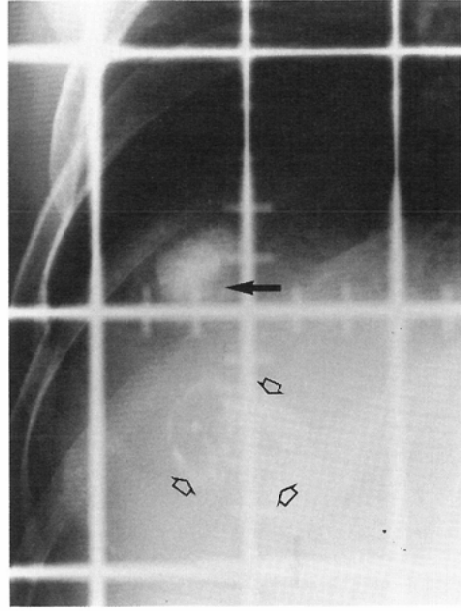
2. 照射野設定

換気量変化と互換性があることが確認された胸・腹圧の変化を呼吸情報として位置決めを行った。生体においては横隔膜と連動する Target Volume の位置は安静呼気終期において最も再現性が良好であると考えられたため、安静呼気終期を基準とし Target Volume の尾側方向への動きの許容を 5mm 以下とした。シミュレータ X 線透視下に個別に Gate レベルを設定して照射野を決定した。Gate 信号を用いて X 線撮影を行った結果、照射野内に病巣が位置していることが確認された。

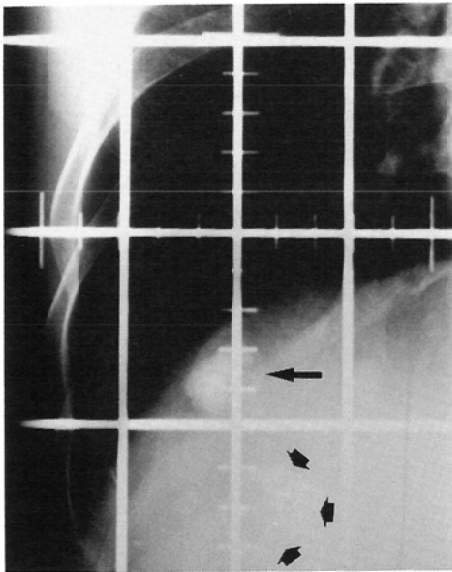
Fig. 6 に一例としてリピオドール塞栓を行った肝癌症例 (2 病巣) のシミュレータ写真を示した。リピオドールによって示される病巣の安静呼



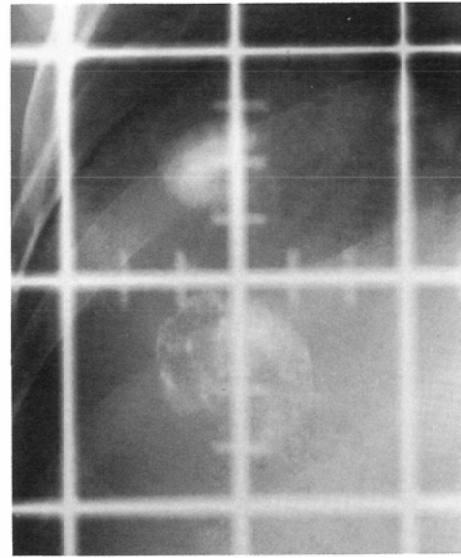
6A



6B



6C



6D

Fig. 6 Treatment fields for the case of two hepatoma lesions following Lipiodol embolization. A to C: The conventional field, A; at the end of quiet expiration, B; at the end of quiet inspiration, C; at deep inspiration. The arrows indicate the tumors. D; The smaller field when synchronized with the end phase (10% of the abdominal pressure) of quiet expiration.

吸移動は約2cmで、通常であれば6×10cmの照射野が必要である(A・B)が、それでもなお深呼吸を行った場合には病巣は6.5cm移動し、照射野か

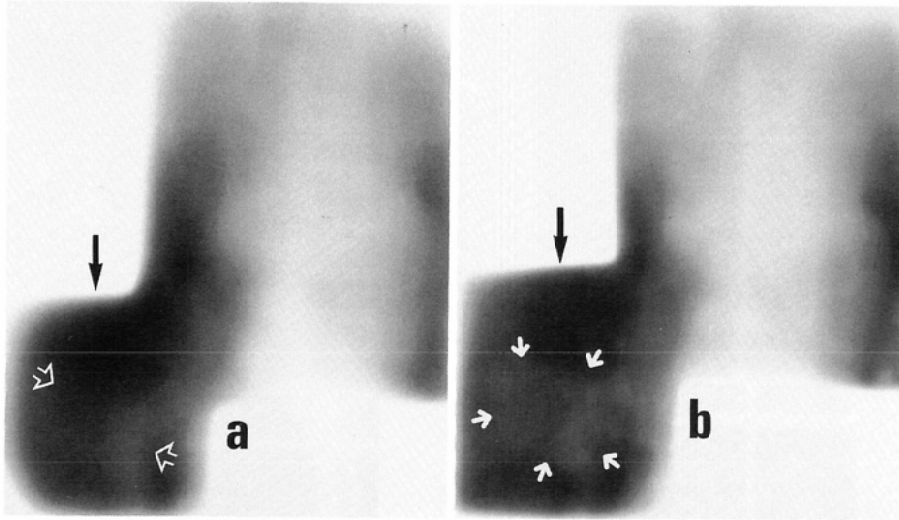
ら外れることが示された。しかし呼吸同調照射が行われれば6×8cmの大きさ照射野で満足される病巣である。

3. ライナック X 線照射

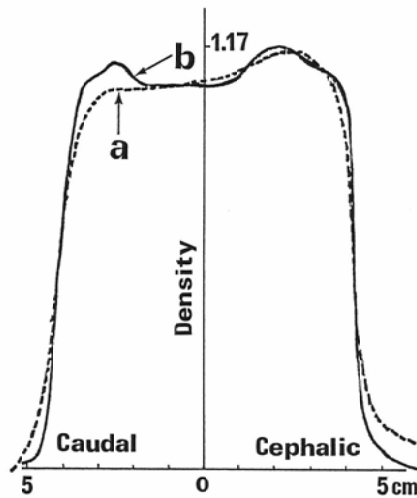
ライナックグラムを週に2~3回撮影し、同調照射の適正をライナックグラムで確認しながら照射を続行した。照射野に対する病巣静止の是非を確認し得た症例は、腫瘤陰影が肺野に囲まれた2例のみであった。ライナックグラム及びそのデン

シトグラムにより病巣の足方端が肺野で囲まれた状態で照射されたことが示された (Fig. 7)。

X線は間欠的に照射されるため、照射時間は通常の連続照射時の約2~3倍に延長した (Fig. 8)。また照射中不規則な呼吸、すなわち深呼吸、咳嗽などが行われた場合にはX線は照射されな



7A



7B

Fig. 7 Verification films and their densitograms of the case of lung cancer with and without synchronization. A: Verification films (a) without and (b) with synchronization. The white arrows indicate the tumor. The black arrows indicate the level of densitometry. The white point indicates the standard point in the tumor location in densitometry. B: Densitograms.

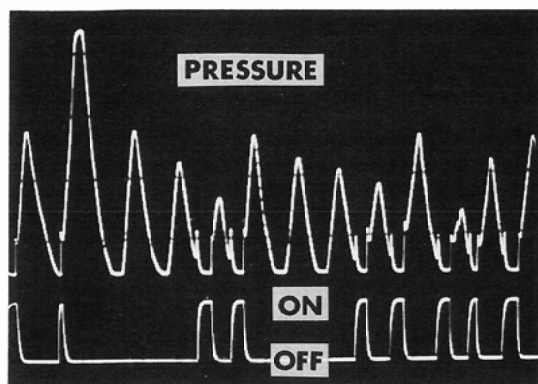


Fig. 8 The oscillogram showing the abdominal pressure and the gate signal.

かった。

レーザー体動検出装置を併用した2例では、左右方向に各々5mmの動きを、頭尾方向には安静呼吸移動を許容する大きさの反射紙を用いた。2例とも自発的体動はみられなかったが、咳嗽後には照射野のずれを修正する必要を生じた。また胸・腹圧によっては検出し難い深呼吸状態はレーザーによって検出することが可能であった。

考 察

放射線外部照射計画の基本作業の一つは、Target Volume すなわち病巣の位置並びに形状を体表面に照射野として具象することにある。Target Volume の把握及びその線量分布の評価は、CTを始めとする画像診断法の進歩により高い精度で行われるようになった。また頭部、頭頸部、四肢などの病巣の照射においては、固定具などの利用により良好な照射体位の再現、照視中の体動抑制が得られ、高い照射精度が保障されている。

しかし、横隔膜近傍にあって呼吸運動の影響を被る病巣の照射計画においては、患者に安静呼吸あるいはより小さな呼吸を要求しつつ、病巣の移動距離分を見込んだ広目の照射野を設定せざるを得ないのが現状であろうと考えられる¹⁾。それでもなお、横隔膜の移動距離は7cm以上にも及ぶことから²⁾³⁾、安静呼吸を維持し難い患者においては病巣を照射野外にのがす恐れがある。また同様に照射計画においても、慣習的に深呼吸状態で撮影されたCT像が用いられるならその線量分

布は実際的でないものになるであろう。

このような移動性病巣に対しても、高い照射精度を確保するための対策として考えられることは次のようなものである。すなわち、1) 呼吸を停止して照射すること(高線量率)、2) 病巣の動きに追従してガントリあるいは治療台を動かすこと、3) 呼吸の一定位相に同調させて間欠的に照射することなどである。画像診断の領域ではすでに呼吸位相に同調させた撮影法が研究されてきている。乳幼児の深吸気胸部X線写真の再現性⁴⁾を始め、CT像⁵⁾、肝シンチグラム⁶⁾、MRI^{7)~9)}などにおける motion artifact の低減に関する研究などである。胸・腹圧に基づく Gate 信号を用いたこれらの研究結果が満足しうるものであると考えられたことから、著者らは本研究目的にもこの方法が適用しうるものと考えた。

本研究においては、ファントム実験では換気量を、臨床適用では胸・腹圧を呼吸情報として Gate を設定し、呼吸同調シミュレータ撮影並びにライナックX線照射を行った。Gate 設定の位相としては横隔膜位置の反復再現性が最も良好であると考えられた安静呼吸終期相を選んだ。シミュレータ写真からは病巣が静止状態にある場合と同様に病巣に局限した照射野を設定しうるものが示唆された。

同調照射の実効性を確認評価する手段として治療線量で曝射したライナックグラム及びそのデンストグラムを用いたが、写真のコントラストが低いため肺野病巣に対してのみ適用解析し得た。これらにより、病巣が計画通り静止状態で照射されたことが証明された。しかしコントラストの得難い腹腔病巣については治療線量域及び高エネルギーに対応しうる密度分解能の高い Computed Radiography¹⁰⁾などのような確認手段の開発が望まれた。

ライナックの作動については、1回換気量、呼吸回数が規定されているファントムでは規則的の間欠照射がなされ、計画通りにライナックが作動したことが示された。一方臨床例では呼吸の不規則さに対応した間欠照射がなされた。照射時間はおよそ2~3倍に延長したが、日常の照射に導入し

うる程度のものであると考えられた。またレーザー一体動検出装置も咳嗽やそれによる体位のづれなどを検知する上で併用の意義が認められた。

以上述べたように本同調照射法の適用により、病巣を静止状態で照射しうることから、病巣により限局させた照射野を設定することが可能であると考えられる。また、殊に陽子線、パイオン、重イオンなどのブラッグ・ピークを利用する粒子線治療においては、その照射計画通りの高精度の線量分布¹¹⁾が具現されるためには、照射中の病巣静止は通常の放射線照射以上に不可欠な条件であることから、同調照射法の適用の意義は大きいであろうと考えられる。

まとめ

呼吸位相同調照射法を開発し、ファントムを用いた基礎実験を行った後、臨床症例に適用した。換気量または胸・腹圧に基づく呼吸周期上に Gate を設定し、Gate 信号によってシミュレータ X 線管及びライナックマイクロ波発振器を作動制御した。

シミュレータ X 線写真及び、ライナックグラムとそのデンストメトリにより同調照射の実効性が確認され、呼吸移動性病巣の照射精度向上に寄与しうるものと考えられた。

稿を終えるにあたり、本研究に甚大なる御協力を賜った本学附属病院放射線部金沢智比古技師並びに森 剛彦主任技師に深謝致します。また、本学在学中御助力賜ったフィリピン大学放射線科 Miriam Joy B. Cantiller-Calaguas 先生に謝意を表します。

本研究の一部は文部省科研費一般研究 (B)「深部臓器がんに対する陽子線治療計画法」(課題番号60480253)によった。また、呼吸位相同調装置の開発には安西総業株式会社

の協力をえた。ここに謝意を表します。

文 献

- 1) 綱野三郎, 阿部公彦, 川名弘二, 広瀬政寛, 池 克志: 肺癌治療はいかにあるべきか. 放射線治療サイドから. 癌の臨床, 28: 1431-1436, 1982
- 2) Wade, O.L.: Movement of the thoracic cage and diaphragm in respiration. J. Physiol., 124: 193-212, 1954
- 3) Weiss, P.H., Baker, J.M. and Potchen, E.J.: Assessment of hepatic respiratory excursion. J. Nucl. Med., 13: 758-759, 1972
- 4) 宮城哲夫, 小川雅庸, 岡萬喜男: 呼吸同調器の検討. 日放技学会誌, 30: 7-12, 1974
- 5) Jones, K.R.: A respiration monitor for use with CT body scanning and other imaging techniques. Br. J. Radiol., 55: 530-533, 1982
- 6) Parkin, A. and Unsworth, G.D.: Improved gammacamera images of the liver using a physiological gating mechanism. Br. J. Radiol., 53: 900-903, 1980
- 7) Schultz, C.L., Alfydi, R.J., Nelson, A.D., Kopywoda, S.Y. and Clampitt, M.E.: The effect of motion on two-dimensional Fourier transformation Magnetic Resonance Images. Radiology, 152: 117-121, 1984
- 8) Runge, V.M., Clanton, J.A., Partain, C.L. and James, A.E. Jr.: Respiratory gating in Magnetic Resonance Imaging at 0.5 Tesla. Radiology, 151: 521-523, 1984
- 9) 前田親彦, 吉川明輝, 山田龍作, 守田瑠璃子, 堀啓二, 神保昌夫, 南條幸夫, 田之上司: 呼吸同期 MRI の開発. NMR 医学, 5: 23-32, 1985
- 10) 蜂屋順一, 是永健雄, 桜井賢二, 宮坂康夫, 似鳥俊明, 若狭勝秀, 古屋儀郎: 輝尽性蛍光体を用いたコンピュータドラジオグラフィ. 医学のあゆみ, 127: 1199-1206, 1983
- 11) 稲田哲雄, 早川吉則, 丸橋 晃, 大原 潔, 石川 演美, 北川俊夫: 深部臓器がんに対する陽子線治療計画法. 日医放会誌, 45: 1047-1055, 1985