

## 呼吸による横隔膜位置と 胸腹 2 点式呼吸モニタリング装置の指示値との相関性の検証

武村 哲浩<sup>†</sup>, 伊藤 啓介<sup>††</sup>, 小路 佐織<sup>†††</sup>, 上田 伸一<sup>†††</sup>, 倉田 雄一<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>金沢大学医薬保健研究域保健学系 〒920-0942 石川県金沢市小立野 5-11-80

<sup>††</sup>順天堂大学医学部附属順天堂医院放射線部 〒113-8431 東京都文京区本郷 3-1-3

<sup>†††</sup>金沢大学附属病院放射線部 〒920-8641 石川県金沢市宝町 13-1

(2010 年 12 月 6 日受付, 2011 年 1 月 18 日最終受付)

### Correlative analysis between diaphragm motion measured using fluoroscopy and the indicator values of a respiratory monitoring device which represent the level of the chest and abdominal wall

Akihiro TAKEMURA<sup>†</sup>, Keisuke ITO<sup>††</sup>, Saori SHOJI<sup>†††</sup>, Shinichi UEDA<sup>†††</sup>, Yuichi KURATA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>Faculty of Health Sciences, Institute of Medical, Pharmaceutical and Health Sciences, Kanazawa University, 5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa 920-0942 JAPAN

<sup>††</sup>Department of Radiology, Juntendo University Hospital, 3-1-3 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8431, JAPAN

<sup>†††</sup>Department of Radiological Technology, Kanazawa University Hospital, 13-1 Takaramachi, Kanazawa, Ishikawa 920-8641 JAPAN

(Received on December 6, 2010. In final form on January 18, 2011)

**Abstract :** [Purpose] We investigated the correlation between diaphragm motion evaluated using fluoroscopy and a respiratory monitoring device (Abches : APEX Medical, Inc, Tokyo), which comprised two arms for measuring changes in the levels of the chest and abdominal walls. [Method] Fluoroscopic abdominal sequences (512×512 matrix, 5.36 f/s) during normal and forced breathing were taken from five healthy men aged 22-23 years. Simultaneously, a video of the respiratory indicator (Abches) was recorded (720×480 matrix, 30 f/s). Diaphragm positions in the fluoroscopic sequences were measured and the indicator values were read from the videos. [Result] During normal respiration there was a linear relationship between the indicator values and diaphragm positions measured using fluoroscopy. The coefficients of correlation ranged from 0.958 to 0.985. During forced respiration the correlation of these values was quadric ( $r=0.919$  to  $0.996$ ). Hysteresis in the relationship between these motions was observed in two of the five cases. [Conclusion] In normal breathing, we found that the correlation between fluoroscopic and respiratory indicator measurements had linearity. In forced breathing, the correlation was quadric, and phase shifting between diaphragm motion and respiratory indicator measurements was observed in two of the five cases.

**Key words :** radiation therapy, respiratory monitoring device, diaphragm motion, correlative analysis, fluoroscopy

### 1. INTRODUCTION

放射線治療における体内臓器の呼吸性移動に対応した照射方法には、呼吸同期法息止め法、呼吸抑制法、動態追跡法がある[1]。このうち、呼吸抑制法以外は経時的な呼吸(性移動)の観察・管理が必要となる。呼吸の観察・管理の方法としては、胸腹部の体表面動きを観察することで体内臓器の動きを推測する方法や、呼吸による換気量をモニターする方法、金マーカなどを体内に埋め込み透視撮影によりその動きを監視する方法などがある。

動態追跡照射や呼吸同期照射では金マーカと透視撮影による監視方法がよく用いられるが、金マーカを体内の腫瘍近傍に埋め込まなければならず侵襲的であり、換気量を監視もしくは管理するシステム[2]もマウスピースと鼻栓を使用しての呼吸となるため患者に負担がかかる。換気量を監視するシステムは、肺癌患者[3]や子供への適応[4]も検討されているが、より負担の少ない胸部腹部など体表面の動きから体内臓器の位置を予測するシステムが、これ

ら金マーカや換気量を監視するシステムより一般的に使用されている。

体表面の動きから体内臓器の位置を予測する手法の基礎的な検討は 2003 年 Onishi ら[5, 6]により CT を用いて腫瘍位置の再現性が検討された。より実際的には、体外のマーカやスパイロメーター等を使って体内臓器位置の予測を検討した研究[7-9]がなされ、そこでは、透視による臓器位置と体外マーカ位置やスパイロメーターの値との相関から、体表面の動きから体内の臓器位置を推測できる可能性が示唆された。また同様に、体幹部を固定しかつ腹部を圧迫することで臓器の呼吸性移動を小さくするための補助具である body frame を併用した検討[10, 11]も行われた。

これらの体表の動きを用いた呼吸管理の方法に関する研究では、いくつかの論文で体内臓器(腫瘍)の位置と体表面の動きを表す値との関係にいくつかの症例において位相差があったと報告[7-9, 11]されているが、それらは胸式呼吸によるものと推測されている。

近年、特に日本では胸部および腹部に接する 2 本のアー

ムにより、胸部腹部両方の上下動を観測しまとめた値としてメーター表示する Abches (エイベックスメディカル) がよく用いられている[12, 13]. この Abches のメーター指示値は、胸腹部の上下動の相対値を表し、どちらかのアームが 1 cm 上がれば (下がれば)、その指示値も 1 上がる (下がる). また胸部および腹部に設置したアームの上下移動量は単純に足し合わされて表示される. そのため、腹部だけでなく胸部の上下動も加味した指示値となるため、胸式呼吸においても Abches 指示値と体内臓器の呼吸性移動のよりよい相関が得られることが期待できる.

本研究の目的は、呼吸による体内臓器の動きと Abches のメーター値との相関性を検証することである.

## 2. MATERIALS AND METHODS

対象者は健康者 5 名 (年齢 22-23, 平均 22.6 歳). 全て男性で事前に実験を説明し了承が得られた者に対して行った. 5 名の被験者の体重, 身長, Body Mass Index 値を Table 1 にまとめる.

体内臓器の呼吸性移動と Abches の指示値の相関関係を見るために、透視撮影により体内臓器、今回は対象が健康者であるため呼吸による動きが明確な横隔膜の動きを記録し同時に装着した Abches による指示値をビデオカメラで録画した.

透視撮影はリニアック (Synergy, Elekta) 搭載のフラットパネルおよび X 線管による透視システム (XVI) を用いた. 撮影条件は、管電圧 100 kV, 管電流 10 mA, パルス幅 10 ms, フレームレートは約 5 f/s, 1 シーケンス最大 150 フレーム (撮影時間 30 秒) であった. 透視画像のマトリックスサイズ 512×512×16 bit であり、リニアックのアイソセンター位置での 1 ピクセルあたりの大きさは 0.518×0.518 mm<sup>2</sup> である.

Abches のメーターは、ビデオカメラ (DZ-GX20, HITACHI) により被験者の足側から十分拡大して録画した (Fig.1(a)). ビデオ画像のマトリックスサイズは 720×480, フレームレート 30 f/s であり、MPEG-2 形式で 8 cm DVD-RAM ディスクに保存される.

実験の際には、被験者はリニアックの寝台の上に仰向きになり、リニアック室の寝台長軸に沿ったレーザーポイントを基準に体軸を合わせ、体表面から触れる剣状突起を頭尾方向および左右方向の基準とし、さらに前後方向は体厚の半分の高さを基準とし、その位置をリニアックのアイソセンターに合わせた. Abches のアームは、胸部および腹部の動きを計測するようにそれぞれ胸骨部および剣状突起と臍部の間に設置した.

呼吸は、楽な状態での自然な呼吸である自然呼吸と最大限の吸気および呼気をしてもらう努力呼吸の2種類で行った. 努力呼吸下での実験では、最大吸気から始め最大呼気-最大吸気-最大呼気までの 1.5 サイクルを透視撮影した. その際、撮影者の指示により吸気および呼気を行った. 自然呼吸下では特に呼吸に関する指示はなく自然な呼吸状態で

Table 1 Characteristics of the five cases

Case	Age	Sex	Height	Weight	BMI*
A	22	M	166	55	20.0
B	23	M	168	58	20.5
C	23	M	165	75	27.5
D	22	M	165	52	19.1
E	23	M	172	75	25.4

\* Body Mass Index

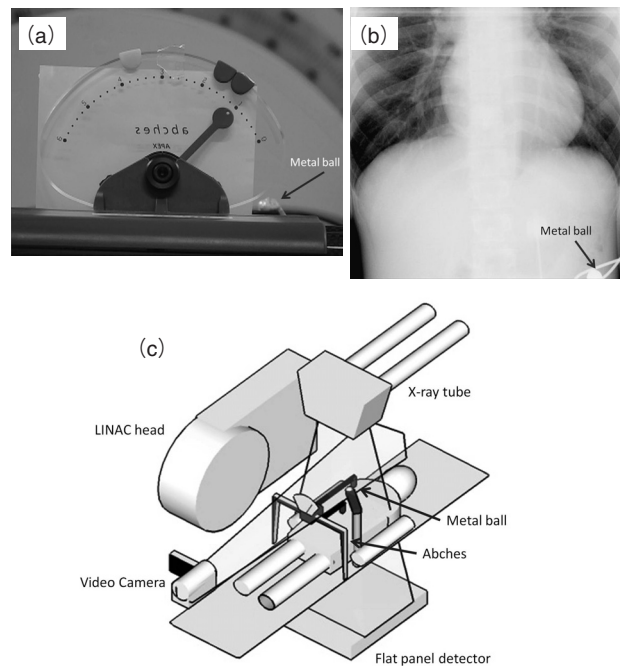


Fig.1 Experimental setup, and the respiration monitoring device indicator (Abches) video and the fluoroscopic sequence obtained. Examples of a video frame showing the respiratory indicator (a), a fluoroscopy frame (b) and the setup for the experiment (c).

3 サイクル撮影した. Abches の指示値を録画するビデオは被験者の足側に設置し、透視撮影時を含めた時間が録画された.

透視画像と Abches メーターのビデオ画像は別々に記録されているため時間的同期が必要になる. そのため約 1 cm の金属球をビデオ画像 (Fig.1(a)) および透視画像 (Fig.1(b)) の視野内にひもを付けて配置し、透視撮影中にひもを急峻に引くことで、画像上金属球が動いた瞬間を基点として透視画像とビデオ間の時間的同期を行った. また実験配置を Fig.1(c) に示す.

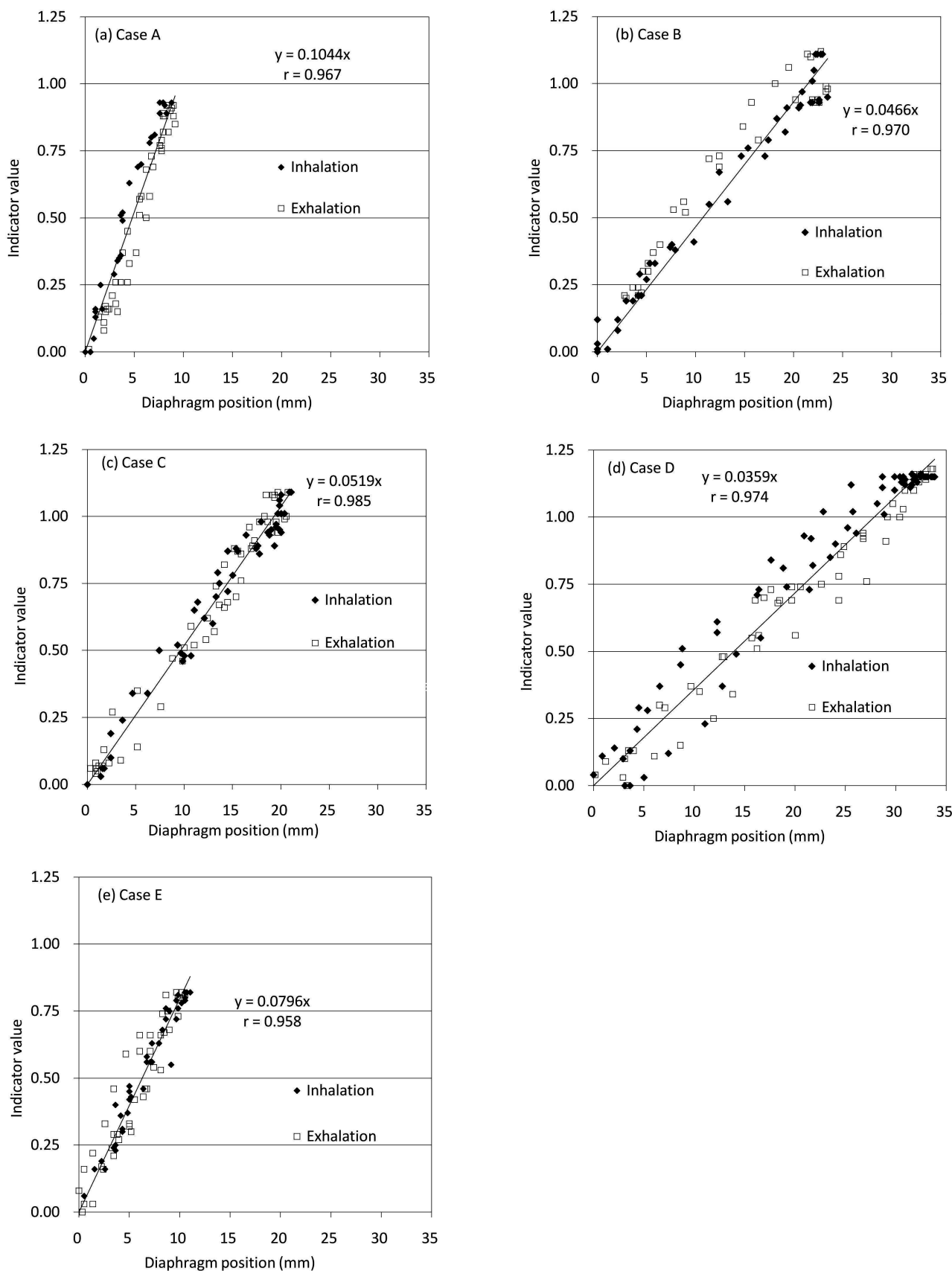
透視画像は PC に取り込み ImageJ (National Institute of Health) を用いて横隔膜頂点の位置を計測した. 計測では、透視画像の横隔膜頂点あたりを拡大し、ImageJ のラインツールを用いて画像の X 軸に沿ったラインを作り、そのラインを上下させ横隔膜頂点に接した際の Y 座標を得た. この計測は撮影した透視画像の全てに対して日を変え 3 度行い、座標値を平均して横隔膜位置の測定値とした. またこの測定値はアイソセンターでのピクセルサイズ (0.518 × 0.518 mm<sup>2</sup>) により距離に変換した.

Abches の指示値のビデオ画像は、DVD-RAM ディスクから PC に取り込み、ビデオプレーヤーソフトでコマ送りし、フレーム毎に Abches メーターの針が示す指示値を読み取った. 透視画像の解析と同様に、日を変え 3 度測定し平均値を Abches 指示値の測定値とした.

横隔膜の位置と Abches の指示値の相関を取るにあたり、どちらも最大吸気時の値をゼロとしそこからの変位量として表した.

## 3. RESULTS

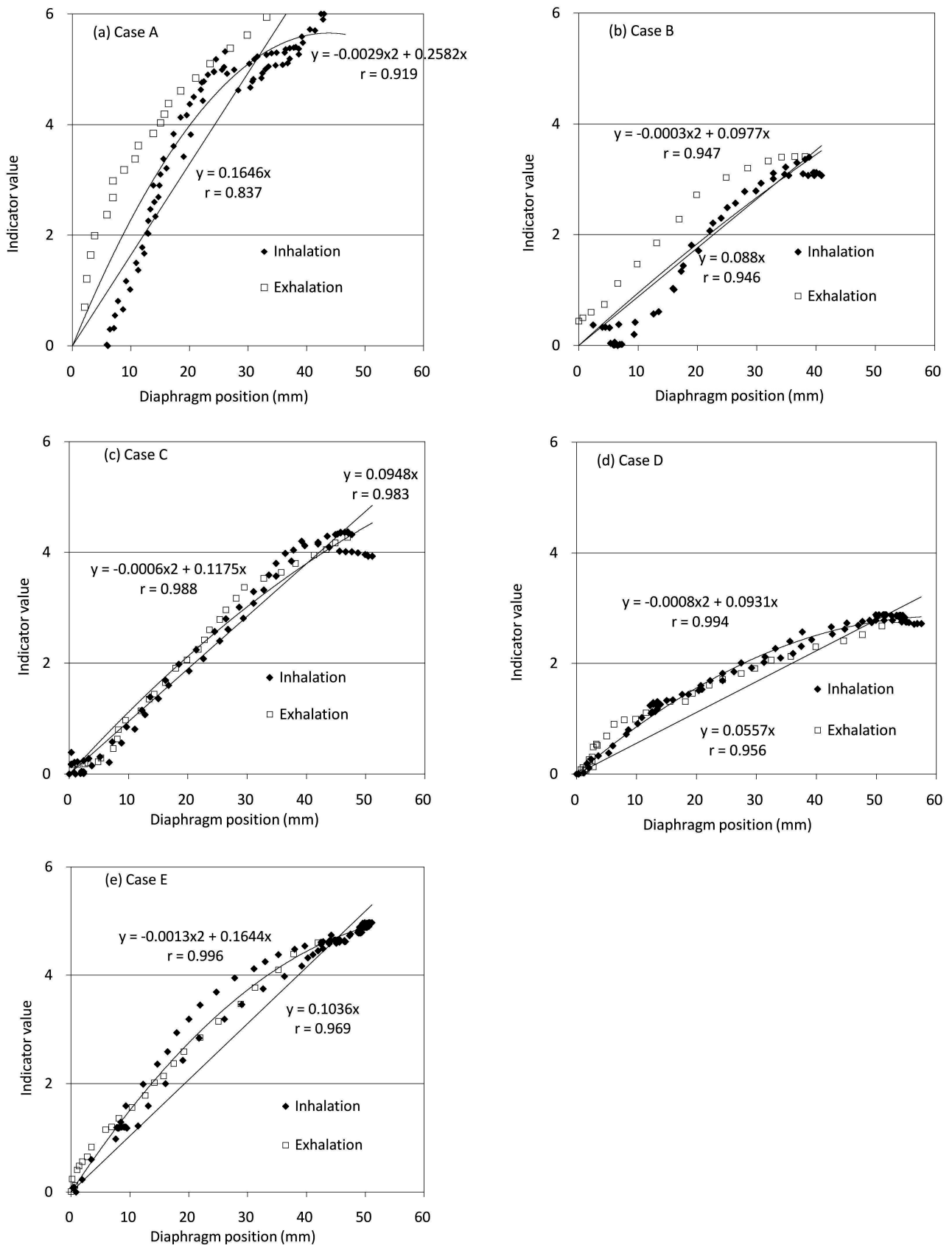
自然呼吸下では全ての症例で傾きは異なるが、横隔膜の位置と Abches の指示値は直線的な相関を示した (Fig.2). また相関係数も 0.958-0.985 (平均 0.971±0.010) と強い相関を示した (全症例で p<0.05).



**Fig.2** Correlation between diaphragm positions and the indicator values of the respiration monitoring device under normal respiration.

努力呼吸下では、全ての症例で二次曲線での近似の方が一次直線よりも高い相関が得られ、一次直線では $r=0.837-0.983$ 、平均 $0.938 \pm 0.058$ であったのに対し、二次曲線では $r=0.919-0.996$ 、平均 $0.969 \pm 0.034$ であった (Fig.3).

また CaseA, B で吸気と呼気の軌道が異なりヒステリシスのようなグラフとなった。



**Fig.3** Correlation between diaphragm positions and the indicator values of the respiration monitoring device under forced respiration.

## 4. DISCUSSIONS

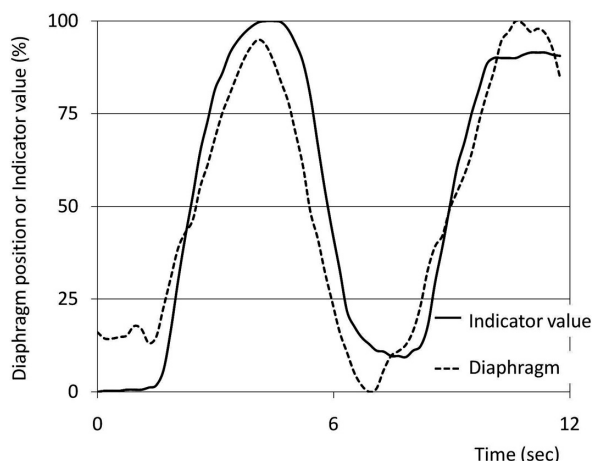
今回使用した Abches は本来患者本人が自発的に息止めをする息止め照射用のビジュアルフィードバックに用いられるものとして開発された器具である。そのような自発息止めによるビジュアルフィードバックを用いた息止めでは肺癌患者に対して高い再現性が確認されている[13]。しかし Abches は自発息止め以外にも、息止め指示による息止め照射にも応用されている。さらに、一部の施設では、メーターを見せることで腹部に不自然な力が入り再現性が悪くなることを懸念しビジュアルフィードバック無しに、つまりメーターを患者に見せず Abches を使用する場合がある。その際には Abches の指示値は照射施行者が患者の息止め位置を確認するためだけの指標となる。そのような際に特に Abches 指示値と体内臓器の位置の相関性の高さが重要となる。

今回の結果では、自然呼吸下では全ての症例で直線的な相関を示しており、Abches の指示値が横隔膜の位置と比例的な関係にあることが言える。相関係数も最も低い値で 0.958 であり高い相関があった。

腹部の動きを計測するシステムでは、自然呼吸下でも位相差が見受けられたが、今回の Abches を用いた検討では自然呼吸下では位相差は見受けられなかった。位相差が確認された報告では、肺腫瘍の動きを計測しているものが多いが[8, 9, 11]、本研究と同様に横隔膜の動きを測定した検討[7]でも位相差は確認されており、計測する体内組織の違いで位相差の有無しが影響されたわけではないと考えられる。対して、本研究の対象者は全て健常な 20 歳代の男性である。この対象者の違いが、自然呼吸下で位相差が見られなかった違いである可能性はあるものの、胸部の動きも計測している Abches では自然呼吸下における体内臓器とシステム指示値の位相差を克服できている可能性もある。ただし、肝臓を対象とした場合は横隔膜に接する臓器であるので、この結果を適応しやすいが、肺癌を対象とした場合は発生部位や症例により、必ずしも横隔膜の動きと腫瘍の動きは一致するとは限らない。対象者や対象部位の違いによる影響を明らかにするには実際に放射線治療する症例を対象に検討する必要がある。

努力呼吸では Abches の指示値と横隔膜の位置の相関は二次曲線であった。つまり最大呼気近くでは、横隔膜が動いたとしてもあまり Abches の指示値は変わらない。逆に最大吸気近くでは、最大呼気近辺よりもより大きく胸腹部が動き Abches の指示値の変化に反映される。通常の息止め照射では、照射施行者により吸気、呼気、息止めの指示がなされるため、特に指示がなければ努力呼吸となる。再現性については検討していないため分からないが、努力呼吸の結果から息止めでの照射では横隔膜の動きにより敏感に Abches 指示値が変化する最大吸気近辺での息止めが、より正しい息止めを確認できる可能性がある。

5 例中 2 例の努力呼吸において、横隔膜位置と Abches 指示値の関係が呼気と吸気で異なるというヒステリシスのような現象が認められた。これは Fig.4 の 4-7 sec に見られるように、横隔膜の動きと Abches の指示値に位相差が存在するためである。これら症例の努力呼吸は、透視画像での主観的な判断ではあるが他の症例と比べ胸式呼吸に近い呼吸と思われた。Case A, B の Abches 指示値と横隔膜位置の波形の位相差は、それぞれ約 0.11 sec, 0.20 sec であった。Mageras[7], Hoisak[9]や中村[11]らが報告した位相差は自然呼吸下の検討で、それぞれ最大 0.7 sec, 最大 0.65 sec, 0.33 sec であり、今回の症例での位相差はそれらよりも小さな



**Fig.4** An example of the phase shift in diaphragm positions and the respiratory indicator values during forced respiration. To clearly depict the phase shift, the diaphragm positions and the indicator values were represented as percentages based on the maximum difference in the positions or values.

値となった。これら位相差があると報告された実験では、体外マーカーは腹部の上に置かれており腹部の動きを観察している。Abches では胸部腹部の動きを観察しているため、位相差の原因と考えられている胸式呼吸の影響を軽減できた可能性もある。

一般に胸式呼吸は女性や太った方に多いとされているが、今回位相差が見られた 2 例 (Case A, B) はどちらも対象の 5 人なのかでもやせており (Table 1)、そのような症例でも努力呼吸では Abches 指示値と横隔膜位置のあいだには位相差を生む可能性を示している。そのため、通常の息止め照射に Abches を使用する際には透視撮影など、リアルタイムで体内を確認できるシステムとの併用が必要と考える。

## 5. CONCLUSIONS

正常例を対象とした今回の検討では、自然呼吸下で Abches 指示値と横隔膜位置に直線的な相関性を確認できた。また自然呼吸下では横隔膜の動きと Abches の指示値の変動の間に時間的な位相差は見られなかった。

努力呼吸下では Abches 指示値と横隔膜位置の関係は二次曲線であった。また 5 例中 2 例で Abches 指示値の変動と横隔膜の動きに位相差が認められた。そのため、自発息止めではない通常の息止め照射に Abches を使用する際には透視撮影などを併用することが必要と考える。

## 6. ACKNOWLEDGEMENTS

本研究は本学医学倫理委員会により承認された (HS21-11-1)。

## 7. REFERENCE

- [1] 大西洋, 萬利乃寛, 青木真一, 他: 胸腹 2 点式簡易呼吸インジケータ (アブチェス) とバイオフィードバック効果を応用した自己呼吸停止下照射 4D (動体) の 3D (静止) 下のメリット, 臨床放射線, 53(3), 411-416, 2008.
- [2] Stromberg JS, Sharpe MB, Kim LH, et al: Active breathing control (ABC) for hodgkin's disease: reduction in normal tissue irradiation with deep inspiration and implications

- for treatment, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 48(3), 797-806, 2000.
- [ 3 ] McNair HA, Brock J, Symonds-Taylor JRN, et al: Feasibility of the use of the Active Breathing Coordinator (ABC) in patients receiving radical radiotherapy for non-small cell lung cancer (NSCLC), *Radiotherapy and Oncology*, 93, 424-429, 2009.
- [ 4 ] Claude L, Malet C, Pommier P, et al : Active breathing control for Hodgkin's disease in childhood and adolescence : feasibility, advantages, and limits, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 67(5), 1470-1475, 2007.
- [ 5 ] Onishi H, Kumriyama K, Komiyama T, et al: CT evaluation of patient deep inspiration self-breath-holding : How precisely can patients reproduce the tumor position in the absence of respiratory monitoring device? *Medical physics*, 30(6), 1183-1187, 2003.
- [ 6 ] Onishi H, Kuriyama K, Komiyama T, et al : A new irradiation system for lung cancer combining linear accelerator, computed tomography, patient self-breath-holding, and patient-directed beam-control without respiratory monitoring devices, *Medical Physics*, 56(1), 14-20, 2003.
- [ 7 ] Mageras GS, Yorke E, Rosenzweig K, et al : Fluoroscopic evaluation of diaphragmatic motion reduction with a respiratory gated radiotherapy system, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2(4), 191-200, 2001.
- [ 8 ] Ahn S, Yi B, Suh Y: A feasibility study on the prediction of tumor location in the lung from skin motion, *British Journal of Radiology*, 77, 588-596, 2004.
- [ 9 ] Hoisak JDP, Sixel KE, Tirona R, et al : Correlation of lung tumor motion with external surrogate indicators of respiration, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* , 60(4), 1298-1306, 2004.
- [10] Stock M, Kontrisoa K, Dieckmann K, et al: Development and application of a real-time monitoring and feedback system for deep inspiration breath hold based on external marker tracking, *Medical Physics*, 33(8), 2868-2877, 2006.
- [11] 中村光宏, 成田雄一郎, 松尾幸憲, 他 : 非侵襲的呼吸同期照射に向けた腹壁運動と肺腫瘍運動との相関解析, *日本放射線腫瘍学会誌*, 20, 119-125, 2008.
- [12] Bengua G, Ishikawa M, Sutherland K, et al : Evaluation of the effectiveness of the streotactic body frame in reducing respiratory intrafractional organ motion using the real-time tumor-tracking radiotherapy system, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* , 77(2), 630-636, 2010.
- [13] Onishi H, Kawakami H, Marino K, et al : A simple respiratory indicator for irradiation during voluntary breath holding : A one-touch device without electronic materials, *Radiology*, 255(3), 917-923, 2010.