

低磁場 MRI 装置による胸部画像の Realignment 処理による呼吸運動解析

北村茂三, 笛吹修治, 堀口隆良, 秋山實利

広島国際大学大学院総合人間科学研究科医療工学専攻

要 旨

肺の局所呼吸運動の解析は、呼吸器疾患の病態把握や術前術後の機能評価に重要である。現在まで X 線単純写真や CT 画像を用いた解析が行われてきたが、被曝や横隔膜の動態評価に問題があった。一方、MRI の高速撮像を用いた呼吸運動の解析が近年注目を集めている。MRI では被曝が無いことから連続撮像が可能な点や、横隔膜、胸郭の動態解析が出来る点が有利であるが、問題点としては連続撮像で得られた多量の画像の解析に時間がかかることである。そこで今回、脳機能解析に用いられている public domain software である SPM (Statistical Parametric Mapping) の動きの補正を行う部分である Realignment を利用して、0.3 T-MRI 装置により撮像した胸部画像の 3 次元動態解析を行った。スティックのりファントムおよび正常ボランティアの胸部冠状断面について、その dynamic MRI 画像を解析した結果、各軸に対する平行移動量がグラフとして詳細に評価できることが明らかとなり、Realignment 処理が呼吸運動の解析に有効であることが示された。

キーワード：胸部磁気共鳴画像，呼吸運動，画像解析，SPM，Realignment

Inspiratory motion analysis by Realignment processing of chest images with low magnetic field MRI device

Shigemi KITAMURA, Shuji USUI, Takayoshi HORIGUCHI, Mitoshi AKIYAMA

Graduate School of Integrated Human Sciences, Hiroshima International University

Abstract

Analyses of diaphragm and chest wall motions are good indicators to evaluate clinical status and pulmonary function before and after the surgery in the respiratory disease. Recently noninvasive MR images using fast gradient recalled echo techniques have been paid much attention to assess the inspiratory motions. However it is laborious to analyze a large number of dynamic MR images. Therefore, we performed the movement analyses of chest images with a low magnetic field MR device by using a public domain software Realignment in SPM (Statistical Parametric Mapping) which is commonly used for brain functional MRI analyses. On a glue stick phantom and normal volunteers, the dynamic MR images were numerically analyzed by the translation to each axes and the results showed that the SPM Realignment is a useful tool for screening on the magnitude and the characteristic of inspiratory motions.

key words: Chest MRI, inspiratory motion, image analysis, SPM, Realignment

連絡先：

〒739-2695 広島県東広島市黒瀬学園台 555-36

広島国際大学大学院総合人間科学研究科医療工学専攻 北村 茂三

Tel: 0823-70-4578, Fax:0823-70-4542, e-mail:sg05201@mst.hirokoku-u.ac.jp

I. 緒言

胸壁の動きを評価するためには, Konno-Mead の胸部の周囲の長さを連続的に測定する方法¹⁾から始まり, 胸部単純 X 線写真²⁾, X 線透視³⁾, 超音波^{4) 5)}, テレビモニター⁶⁾, ヘリカル CT の再合成画像による 3 次元的な計測⁷⁾などの提案がされてきたが, 評価に対する問題点も同時に指摘されてきた。

たとえば胸部単純 X 線写真では, 重なりが生じ移動距離の測定が正確ではなく, また横隔膜, 胸壁の部分的な運動評価は困難である。また CT では横断像のため各呼吸状態で撮像断面がずれてしまい, 上下に移動する横隔膜の評価は難しい。さらに, 局所の形態的な異常の検出には有用であるが, 通常の撮影では肺の直接的な機能評価はできない⁸⁾。そして短時間で連続的な呼吸(特に横隔膜)運動を画像化することも不可能である⁹⁾。また被曝の問題もある。

一方, 近年 MRI 装置の進歩により高速撮像法が可能となったことから, MRI による胸壁運動評価についてもさまざまな報告がなされている⁹⁻¹⁷⁾。たとえば Gierada らは, gradient recalled echo (以下, GRE) 法を用いて, 安静呼吸において胸壁の同定が可能な画像を得て, 横隔膜運動の評価を行った⁹⁾。また岩澤らも GRE 法や single shot fast spin echo (以下, SSFSE) 法を用いて安静呼吸にて撮像し, 左右の横隔膜の動きが異なること, あるいは肺気腫患者で横隔膜がシーソー状に動くことを報告した¹²⁻¹⁴⁾。さらに MRI では, 横隔膜の胸骨, 肋骨, 椎体への付着部も観察可能であり¹¹⁾, 呼吸運動評価に有用性が示唆される。しかし, 問題点としては, 大量の画像処理に時間がかかることがあげられる。そこで, 今回 PET, functional-MRI(以下 fMRI)等の脳機能評価に使用されている Statistical Parametric Mapping (以下, SPM)のソフトを利用して, 胸部 dynamic MRI 画像の解析を行い, 胸部運動の評価を検討した。

動きの解析には, SPM 中の Realignment サブルーチンを用いた。これは, fMRI を例にとると, データ収集中に頭を動かしてしまうと, データ分析における信憑性が低下するため, このサブルーチンを使って元の位置に戻すように補正していくものである。Realignment では, X, Y, Z 軸すべ

ての方向の Translation と Rotation 操作を行い, その結果をグラフとして表示する。今回の検討は, この Realignment を利用して, スティックのりファントムを用いての実験と永久磁石型 0.3 T-MR 装置による正常ボランティア胸部の冠状断面の MRI 画像の動きを, 手作業による ROI の設定などを行わずに, 簡便に解析する方法を試みたので報告する。

II. 方法

使用機器は, GE 社製 SIGNA EXCITE HD 1.5 T, 日立製 AIRIS-II comfort 0.3 T である。検討したのはスティックのりファントムを使用した実験と, 検査の目的・意義等を十分に説明し, 同意の上で署名をいただいたボランティア 10 人(男性 4 人, 女性 6 人, 年齢 21~41 歳, 平均 31.4 歳)である。撮像条件は, スティックのりファントムに対しては, 2D, Fast Imaging Employing Steady-state Acquisition (以下, FIESTA) 法を使用し, 2D, Sagittal にて TR=6.6 msec, TE=1.5 msec, FA=90°, NEX=1, Matrix=128×256, FOV=18 cm, TH=10 mm, Spacing=0 mm, BW=125 kHz, ファントム中心を 150 Dynamic/slice, 0.87 sec/dynamic, scan-time は 2 分 10 秒にて撮像した。

ボランティアにおいては, 0.3 T 装置を用い, 2D, Balanced steady state acquisition with rewound gradient echo(以下 BASARGE)法を用い, Coronal にて TR=7.6 msec, TE=3.8 msec, FA=70°, NEX=0.5, Matrix=64×128, FOV=35 cm, TH=10 mm, Spacing=0 mm, 胸部全体を 20 slice, 10 Dynamic/1slice, scan-time は 21 秒, 息止めにて撮像した。

使用ソフトウェアは, SPM2(Public domain, <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>)および SPM を動かすためのプラットフォームである MATLAB6.5(PC 版 Cybernet Systems Co.,Ltd)を用いた。データを SPM で扱えるアナライズフォーマットのデータに変換するソフトとして MRICro(Chris Rorden)を用いた。

実験方法は, スティックのりファントムについては, スティックのり(長さ 10cm)に木製の棒をつけて, 塩化ビニールの筒に挿入し, 基準の位置と 30 mm 前まで動かした位置において, ファントム

中心を1スライスで10回撮像を行った。(Fig. 1). 画像をDICOM formatにより、汎用パソコンに転送した。転送したデータをMRIcroによりAnalyze formatに変換した。なおこの時点で2Dデータをボリュームデータに変換し、SPM2のRealignment処理を行った。スティックのりファントムにおいては、筒と垂直方向をZ軸、筒方向をY軸と定義し(Fig. 2),それぞれの移動量をグラフとして表示した。次に、それぞれの軸について最大値と最小値を求め、その差を移動量として評価を行った。さらにRealignmentの処理データとオリジナル画像での動きの実測値とを比較検討した。

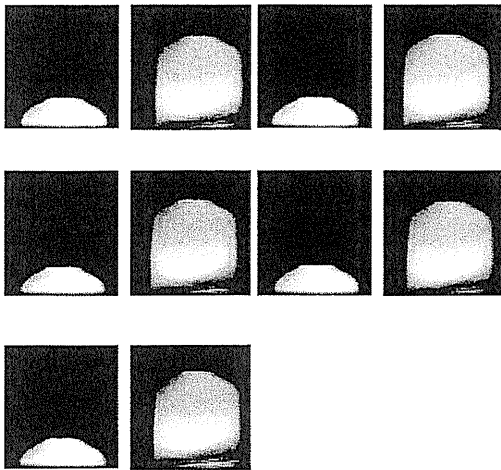


Fig. 1 Round-trip series of 10 images of glue stick phantom.

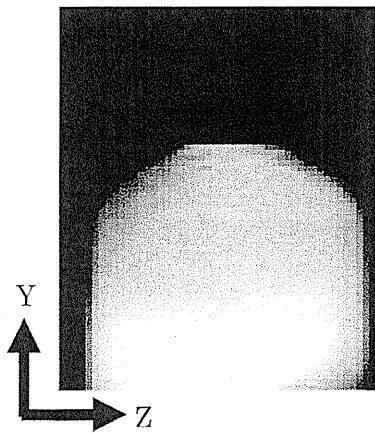


Fig.2 Definition of axes on glue stick phantom.

ボランティアにおいては、息止めにより肺全体を背部より胸骨上部まで、Coronalにて深吸気、深呼気による撮像した。正常ボランティアにおける軸の定義は、Y軸を頭足(A・P)方向、Z軸を左右

(R・L)方向とした(Fig. 3). 以下の処理についてはファントム実験と同様である。得られたDICOM画像を、MRIcroにより背部より胸骨上部までのボリュームデータとしてAnalyze処理し、運動解析データをグラフとして表示した。処理したデータから、最大値と最小値を求め、その差を動きとして評価した。

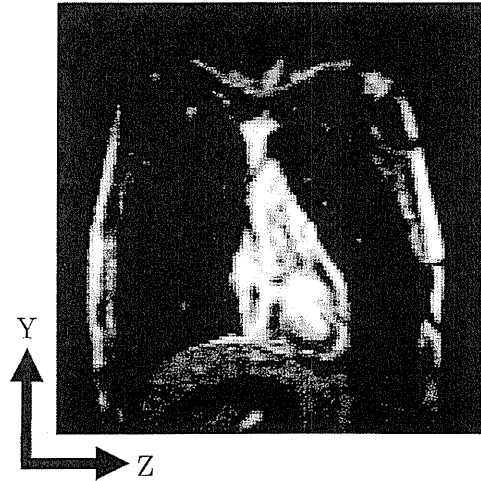


Fig. 3 Definition of axes on coronal image

III. 結果

スティックのりファントムにおいて撮像した合計10 Dynamicsの画像をRealignment処理した結果をFig. 4に示す。この処理では1枚目の画像を基準として残りの9画像をY、Z軸方向の平行移動(Translation)と回転移動(Rotation)による重ね合わせを行っている(スライス厚方向のX軸については、2Dのデータのため評価していない)。今回の実験では、Rotationに関してはほとんど動きがないため、Translationの結果のみを示している。Fig. 4の縦軸の単位はmmで、横軸はImage数であり、10 Images分のデータがあることを示している。

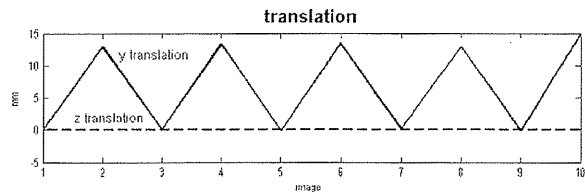
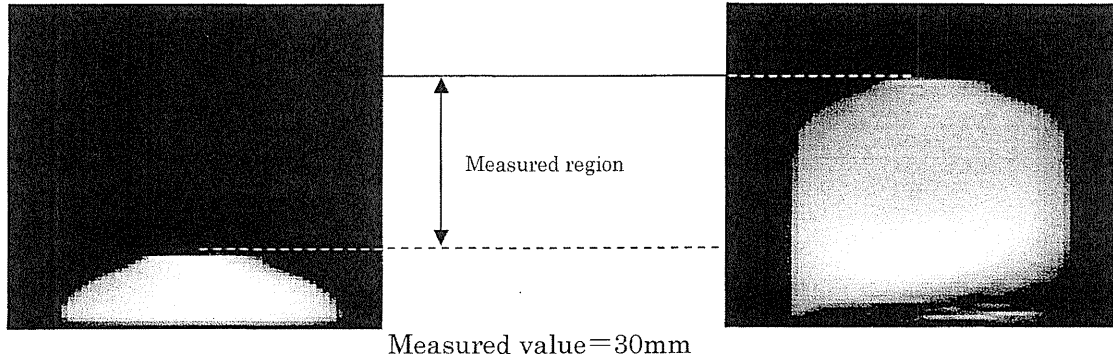


Fig. 4 Estimated movements from a time series of 10 images of glue stick phantom using SPM realignment.

スティックのりファントムでは, 筒内にスティックのりを入れているため, Y 軸方向のみに動きが表れており, Z 軸にはほとんど動きがないことがわかる. この結果より, Realignment により動きの方向が評価できることが明らかとなった.

Fig.5 は, MRI 画像において, 実測した範囲と実測値を示している. 実測値では, 約 30mm 動いており, Realignment から得られた移動量 (15 mm) の 1/2 の結果となった (Fig. 6).



The measured value (30 mm) was almost the same as that obtained from the Realignment
 Fig. 5 Measured region on the image of the glue stick phantom.

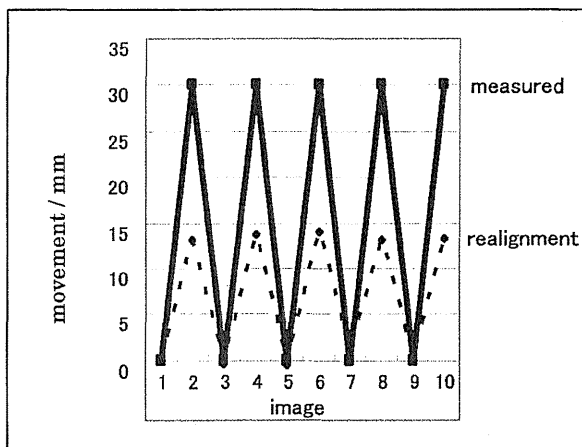
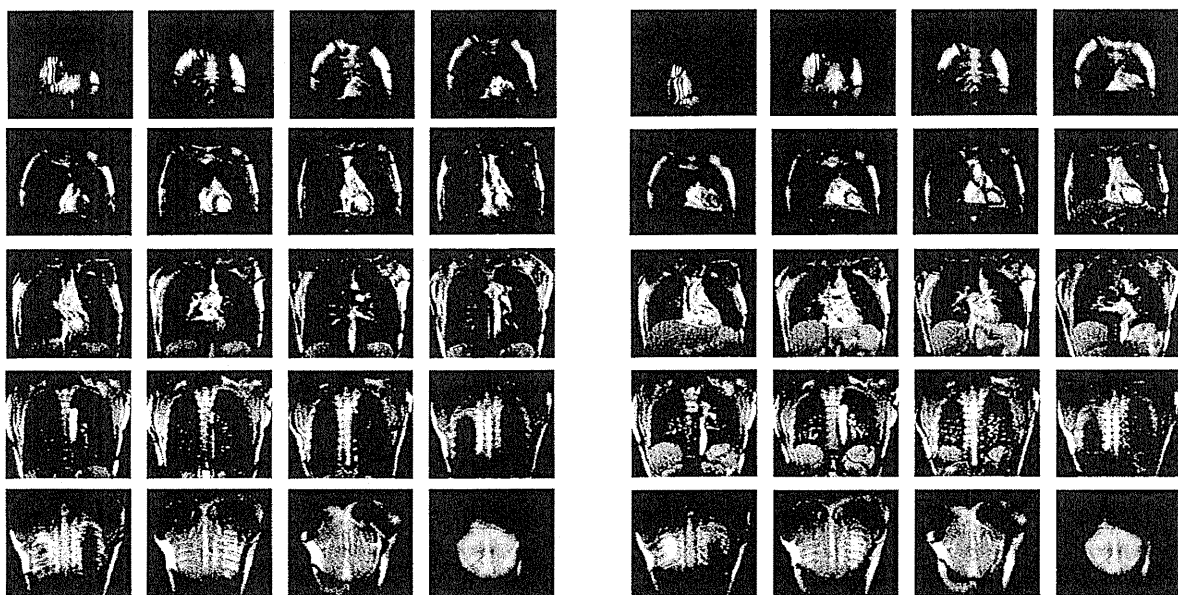


Fig.6 Relation between actual values(measured) and estimated values (realignment) in glue stick phantom.



(a) inspiration

(b) expiration

Fig. 7 20 slices of coronal imaging with breath-hold in a healthy volunteer.

Fig. 7は、正常ボランティアの吸気、呼気における前胸壁から背部肋骨までの画像を示す。Fig. 7-1(吸気)と Fig. 7-2(呼気)と比較すると、特に横隔膜の位置が大きく違うことがわかる。さらに、同一スライス位置を撮像しているにもかかわらず、前後方向の胸郭の広がりにより、前胸部の見え方が違うことがわかる。

スティックのりファントムの時と同様にこれらの画像を Realignment 処理した結果を Fig. 8 に示す。胸部画像においても回転運動は無視できる程小さかったので、Translation の結果のみ示している。なお、X 軸の左右方向については、スティックのりファントムと同様に 2D データのため評価できない。Fig. 8 の結果より、Y 軸の横隔膜-肺尖方向が最大で約 7mm 動き、背腹方向の Z 軸が約 4mm 動いていることがわかった。吸気、呼気の息止めを交互に実施することにより、動きを評価できることがわかった。

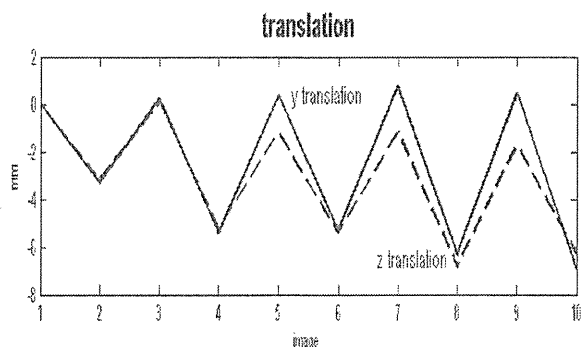


Fig. 8 Estimated movements from a time series of ten 3D-images of a healthy volunteer using SPM realignment.

Fig. 9は、ボランティア 10 人のデータを Y, Z 軸の動きの最大値を比較したものである。このグラフから、最も動いているボランティアで、Y 軸において、約 10 mm, Z 軸において約 7.5 mm となっている。このグラフから、Y 軸の横隔膜が大きく動く腹式呼吸と、横隔膜とともに Z 軸の前胸壁も動く胸式呼吸の 2 パターンがあり、Realignment による解析によりグラフとしてパターン認識可能なことがわかった。

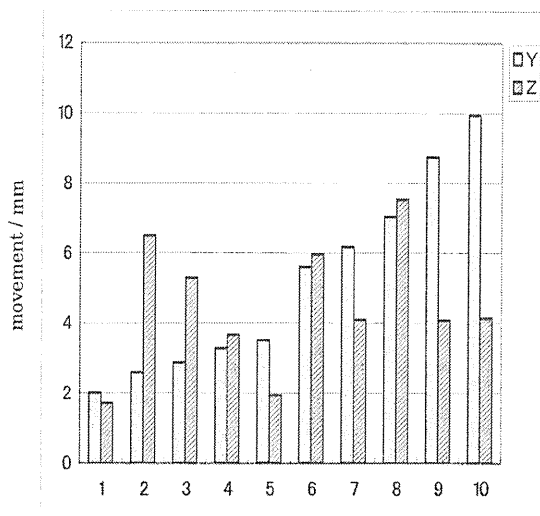


Fig. 9 Result of estimated movements in each axes (y and z) on 10 healthy volunteers.

IV. 考察

現在の MRI による胸郭運動解析のデータ処理上の問題点は、基本的に MRI による連続撮影によって実施していることにより大量の画像が発生するため、それらすべてのイメージの詳細な読影や解析が困難なことである。さらにそれらの画像を解析して有用な指標を得るには、膨大な時間を要する。またこれらの解析は煩雑であるため、各施設が独自に開発したプログラムを用いて解析しているのが現状である。従って操作が簡便で、臨床的に有用な自動解析システムの開発が早急に望まれている。汎用ソフトの SPM はその可能性を十分に備えていると考え、その有用性を検討した。

今回、スティックのりファントムのデータを解析することにより、頭部の動きの補正用として使用されていた SPM の Realignment の処理が、画像の動きを数値、グラフとして表すことができ、また画像の動きをより詳細・簡便に評価できるものであることがわかった。スティックのりファントム実験により、Realignment データと実測値と比較すると、約 1/2 の評価となった。これは MRicro において、2D データをボリュームデータとして処理を行ったため、30 mm 前方での位置とスタート位置 0 mm の平均値を計算していると考えられ、15 mm という 1/2 の評価となったと考えられた。なお 2D のままでデータ処理をすれば、Realignment データは 30 mm となることは確認済みである。

今回スティックのりファントムのデータを解析することにより、頭部の動きの補正用として使用されていたSPMのRealignmentの処理が、画像の動きを数値、グラフとして表すことができ、動きをより詳細にまた簡便に評価できることがわかった。また、ボランティアの息止めの実験データでは、スティックのりファントムと同様の結果が得られたことから、実際の胸部画像においても運動解析に利用可能であることが確認された。

肺全体を深吸気、深呼気による21 secの息止めをCoronalにて20スライス撮像したが、特に横隔膜の位置が大きく違うことが画像上明確となった。Realignmentすると、最も動きを大きく評価したボランティアにおいて、Y軸(頭足)方向で約10.0 mm, Z軸(前後)方向で約7.5 mmとなった。1スライスごとに画像を分析すると、大きく動いているスライスと、ほとんど動いていないスライスがあった。

これは今までに報告されている、胸部X線写真を用いた胸壁の動きの結果²⁾と比較すると動きは小さい。鈴木らによれば、最大吸気と呼気間の横隔膜の移動距離は、3~7 cmの範囲で個人差が大きく、また横隔膜の動きは必ずしも左右同じではないと報告している²⁾。

しかし今回の実験ではRealignmentする段階で、肺全体、つまり20スライスのボリュームデータとして画像処理したため、肺の動きが平均化されている。さらに左右の横隔膜の動きも平均化されているものと考えられる。今回の実験との最も大きな相違点は、胸部X線写真が2次元のデータであるのに対し、MRIのデータがボリュームデータとして処理したためである。

このような場合に吸気画像と呼気画像を大量の画像データから抽出するための手段として、この汎用ソフトであるSPMによるRealignment処理は、どこの施設においても評価可能なことから大変有用である。また呼吸運動に伴う胸壁や横隔膜などの移動量の相対的な大きさについての情報もスライスごとに得られるため、症例に応じたパターン解析ができる可能性が示された。

今回は、0.3 T装置で実験したことで、どの施設のどの装置でも、動きの検定が可能であり、臨床的意義は大きい。また今回は、息止めによるデータ撮像を行ったが、息止め困難な患者もいるため、安静呼吸状態で撮像することが必要となる。

臨床応用については、肺気腫や肺線維症や閉塞性肺病変等への容積減少手術症例への応用が期待されている。この方法は、正常な肺機能を有していない肺気腫を切除し、肺容積を減少させることにより、胸郭や横隔膜の運動を回復させ、残存した正常肺の換気を改善するものである。胸壁や横隔膜のどの部分がよく動くのか、また移動距離がどの程度かといった情報を把握することにより、術前のTarget areaの決定に役立てようと試みられている。その他に肺腫瘍、特に基礎疾患に肺線維症や慢性閉塞性肺炎を有する患者の肺切除術の適応や切除範囲の決定にも有用である。さらに術前、術後の肺の運動機能がどの程度回復できるかを予測する可能性、また自覚症状との関連についての有用性に関する報告もある¹⁸⁻³³⁾。

MRIを利用する最大の利点は、断面の制限がないこと、繰り返し検査可能で術前術後の評価が容易にできることである。またMRIでは、Sagittal, Coronal像において、横隔膜や胸郭の移動状態が正確に判定でき⁹⁾、1秒未満の連続撮影も可能¹²⁾であり、安静呼吸下においても画像上ほぼ静止状態で撮像可能となる。

今後の改善点としては、2D, 3Dの息止めによる撮像時間の短縮とその評価を探索することが、上げられるが、これはサンプリングタイムを短縮して、アーチファクトの影響をより少なくして、より詳細な画像を撮像することにより、正確な解析が可能と思われる。

V. 結語

今まで前後・頭足・左右方向の2次元的な胸壁の運動解析は可能であったが、SPMによって各軸に対する平行移動・回転の運動解析ができることにより、3次元的に詳細な解析が可能となり、数値として判定できるようになった。SPMはさまざまな応用が考えられる方法であり、PET, SPECT, Functional-MRIのみならず、胸部動態解析においても、容易に検定することが可能なので有用性が高く、今後も広汎な応用が期待できるものと思われる。

VI. 謝辞

この実験にあたり、ご指導いただいた広島県立身体障害者リハビリテーションセンター放射線科の村中博幸氏、国家公務員共済組合連合会 吉島

病院 放射線科の坂中 和仁氏, 印平 紫氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Konno K , and Mead J : Static volume-pressure characteristics of the rib cage and abdomen. J Appl Physiol, 24, 544-548, 1968.
- 2) 鈴木 俊介 : 横隔膜麻痺. 主要疾患一病態・診断・治療. 194, 730-733, 2003.
- 3) Warner D, and Warner MA : Human chest wall function while awake and during halothane anesthesia. Anesthesiology, 82, 6-19, 1995.
- 4) Davies SC, Hill AL, and Holmes RB, et al. : Ultrasound quantitation of respiratory organ motion in the upper abdomen. Br J Radiol, 67, 1096-1102, 1994.
- 5) Ueki J, De Bruin PF, and Pride NB : *In vivo* assessment of diaphragm contraction by ultrasound in normal subjects. Thorax, 50, 1157-1161, 1995.
- 6) De Groote A, Wantier M, and Cheron G, et al. : Chest wall motion during tidal breathing. J Appl Physiol, 85 (5), 1531-1537, 1997.
- 7) Cassart M, Pettiaux N, and Gevenois PA, et al. : Effect of chronic hyperinflation on diaphragm length and surface area. Am J Respir Crit Care Med, 156, 504-508, 1997.
- 8) 戸上 泉, 笹井 信也, 平木 祥夫ほか : MRI による胸壁, 横隔膜の呼吸運動の評価. 臨床画像, 16, 1438-1445, 2000.
- 9) Gierada DS, Erickson SJ, and Curtin JJ, et al. : Diaphragmatic motion, Fast gradient-recalled-echo MRImaging in healthy subjects. Radiology, 194, 879-884, 1995.
- 10) Holland AE, Goldfarb JW, and Edelman RR, et al. : Diaphragmatic and cardiac motion during suspended breathing ; Preliminary experience and implications for breathhold MRImaging. Radiology, 209, 483-489, 1998.
- 11) Cluzel P, Thomas S, and Mare Z, et al. : Diaphragm and chest wall ; Assessment of the inspiratory pump with MRImaging-preliminary observations . Radiology, 215, 574-583, 2000.
- 12) Iwasawa T, Kawamoto M, and Yoshike Y, et al. : Normal in-plane respiratory motion of the bilateral hemidiaphragms evaluated by sequentially subtracted fast magnetic resonance images. Journal of Thoracic Imaging, 14, 130-134, 1999.
- 13) Iwasawa T, Yoshiike Y, and Saito K, et al. : Paradoxical motion of the hemidiaphragm in patients with emphysema. J Thorac Imaging, 15, 191-5, 2000.
- 14) Suga K, Tsukuda T, and Awaya H, et al. : Impaired respiratory mechanics in pulmonary emphysema ; Evaluation with dynamic breathing MRI. JMRI, 10, 510-520, 1999.
- 15) Gauthier AP, Verbanck S, and Esteune M, et al. : Three-dimensional reconstruction of the *in vivo* human diaphragm shape different lung volume. J Appl Physiol, 76 (2), 495-506, 1994.
- 16) Iwasawa T, Kagai S, and Gotoh T et al. : MR analysis of abnormal diaphragmatic motion in patients with emphysema. Eur Respir J, 19, 225-31, 2002.
- 17) 岩澤 多恵, 影井 清一郎, 後藤 敏行ほか : MRI による胸壁の呼吸運動の検討. 臨床放射線, 46, 14-19, 2001.
- 18) 戸上 泉, 笹井 信也, 平木 祥夫ほか : 肺の局所呼吸運動の評価. INNERVISION(13・10), 15-18, 1998.
- 19) 三嶋 理晃 : 胸郭の imaging による検査. 呼吸 19 巻, 5, 491-496, 2000.
- 20) 戸上 泉, 笹井 信也, 平木 祥夫ほか : 肺気腫患者の呼吸運動の MRI による評価. 臨床放射線, 43, 121-128, 1998.
- 21) Gierada DS, Hakimian S, and Slone RM, et al. : MR analysis of lung volume and thoracic dimensions in patients with emphysema before and after lung volume reduction surgery. AJR, 170, 707-714, 1998.
- 22) 森 泰胤, 加藤 勤, 佐藤 功ほか : 肺腫瘍患者における肺葉別肺機能評価 MRI による

- 検討. 臨床放射線, 42, 159-163, 1997.
- 23) 千原 幸司, 人見 滋樹: 巨大気腫性肺嚢胞症の病型分類と肺機能-横隔膜・胸郭運動から見た検討- . 日呼外会誌, 3, 511-523, 1989.
- 24) 佐原 寿史, 糸井 信一, 上野 教男ほか: 肺気腫の横隔膜・腹部-胸郭運動. 日胸疾会誌, 34, 258, 1996.
- 25) 日高 昭斉, 中井 真尚, 千原 幸司ほか: Dynamic MRI による肺気腫症例の chest wall motion の解析. 呼吸, 17 (2), 156-162, 1998.
- 26) 岩澤 多恵, 倉林 有, 影井 清一郎ほか: 胸壁運動のオプティカルフロー解析. 映像情報, 臨時増刊号, 75-79, 2001.
- 27) Decramer M : Hyperinflation and respiratory muscle interaction. Eur Respir J, 10, 934-941, 1997.
- 28) Gierada DS, and Slone RM : Imaging evaluation of the diaphragm. Chest Surg Clin N Am, 8 (2), 237-280, 1998.
- 29) Fujimoto K, Kubo K, and Haniuda M, et al. : Improvements in thoracic movement following lung volume reduction surgery in patients with severe emphysema. Intern Med, 38 (2), 119-125, 1999.
- 30) 戸上 泉, 笹井 信也, 平木 祥夫ほか: 肺気腫の容積減少手術に対する MRI の有用性. 臨床放射線, 45, 119-126, 2000.
- 31) 戸上 泉, 三森 天人, 平木 祥夫ほか: 肺気腫の容積減少手術に対する MRI による術前評価. 日本医放会誌, 57, 38-40, 1997.
- 32) 瀬尾 裕之, 森 泰胤, 小林 琢哉ほか: MRI を用いた安静時呼吸動態の評価. 日磁医誌, 17-2, 94-98, 1997.
- 33) 森 泰胤, 加藤 勤, 佐藤 功ほか: MRI を用いた肺葉別肺容積の検討. 日磁医誌, 17-3, 158-161, 1997.