

差分面積を用いた EPI の歪評価

金子 瑠平^{1,2}, 小倉 明夫¹, 鎌倉 碧^{1,3}, 北岡 知也^{1,4}¹群馬県立県民健康科学大学 ²さいたま市立病院³自治医科大学附属病院 ⁴藤田保健衛生大学病院

緒 言

現在、磁気共鳴画像 (MR 画像) の性能評価としての歪みの評価法は National Electrical Manufactures Association (NEMA) からの報告がある¹⁾。NEMA の推奨する歪みの評価法は後述するが、この評価法は装置の性能評価を目標としたものであり、装置性能に起因する比較的小さな歪の評価測定を目的としている。そのため、撮像シーケンスも spin-echo (SE) 法に限定し撮像パラメータ等も限定されたものを使用しなければならない。昨今、echo planer imaging (EPI) を中心とする SE 法以外の撮像シーケンスによる歪みの評価の必要性が増加している。Gradient echo (GRE) シーケンスは磁場の不均一に依存し、特に EPI やそれを使用する拡散強調画像や磁化率強調画像は、画像歪が診断を行う際に多大な影響を与える。これら SE 法以外の歪を測定する際も、現状では NEMA 法に準じた評価法を使用した報告^{2)~7)}が多いが、撮像法によっては、歪の形状が複雑に異なり、従来の NEMA 法では評価が不十分であると考えられる。

近年、多くの撮像法が開発される中で、撮像法に起因する比較的大きな画像歪の定量的評価は不可欠であり、比較的簡便に複雑な形状の歪においても計測可能な歪測定法を考案した。

新たな歪の評価法として、基準画像から評価画像を差分した後、乖離した面積を基準画像で除したもの (以下、面積法) と定義した。この研究では、新しく提案した面積法と従来の NEMA 法との比較からその特性と有用性を検討した。

方 法

1. 使用機器およびファントム撮像

MR 装置は philips 社製の Ingenia 1.5T を使用した。

ファントムは硫酸ニッケル ($1.25 \text{ gNiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O} + 1000\text{gH}_2\text{O}$) を $56 \text{ mm} \times 56 \text{ mm}$ の正方形のプラスチック容器に入れたものを使用し、head-array コイルの中心に設置した後、10 分後に撮像を行った。ファントムサイズは、head-array コイル内に設置可能な大きさとして選択した。ファントムの周囲は空気とした。これは、特に EPI シーケンスにおいて、回りを空気にすることにより、より磁化率の影響を増強させるためである。歪みのない基準画像として SE 法のプロトン密度強調画像を、歪みのある対象画像として EPI で撮像を行った。プロトン密度強調画像の撮像パラメータは繰り返し時間 (repetition time; TR) = 2000 ms, エコー時間 (echo time; TE) = 30 ms, 受信バン

キーワード area method, image distortion, magnetic resonance image, NEMA

ド幅 = 281 Hz/pixel, 加算回数 = 8 回, 有効視野 (field of view; FOV) = 200 mm, スライス厚 = 5 mm, マトリックス数 = 256 × 256 とした. EPI の撮像パラメータは TR = 2000 ms, TE = 最短 TE, 28.31~53.418 ms, 受信バンド幅 = 46 Hz/pixel, 加算回数 = 33 回, FOV = 200 mm, スライス厚 = 5 mm, マトリックス数 = 256 × 256 とした. その際に位相エンコードと周波数エンコードの比率を変化させる rectangular field of view (RFOV) を 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% と変化させ, 6 種類の歪みの度合いを変化させた画像を得た. なお, RFOV100% は位相エンコード数を変化させない正方形の FOV である.

2. NEMA 法による歪みの測定

NEMA 法による測定図を Fig. 1 に示す. NEMA 法では, SE 法で撮像された対象画像と実際のファントムの 45 度以内の対角線の長さを測定し, 長さの対比から歪み率を測定する. そして, その最大歪率を下記式に従い歪率と定義している.

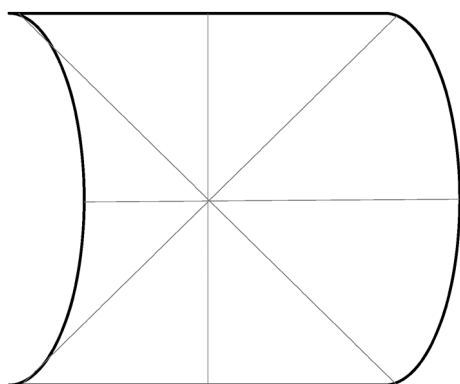


Fig. 1. The measurement method for the distortion ratio by the NEMA method. The length of the diagonal is measured and is measured from the ratio with the reference value.

Geometric distortion ratio =

$$\text{Max}(100 \times |L_m - L_a| / L_a) \dots\dots\dots (1)$$

ただし, L_m : 撮像したファントムの長さ (mm), L_a : 実際のファントムの長さ (mm)

本来の NEMA 法ではそれぞれの画像の歪み率の最大値を用いるが, EPI など複雑な形状の歪を呈する画像の歪み評価は最大値だけでは評価できないと考える. よって, 本研究では対角線ごとのすべての歪み率の平均をその画像の歪み率とした. また, 測定する対象画像と基準となる SE 画像において, 対角線の長さを比較した.

Geometric distortion ratio =

$$\text{Average}(100 \times |L_m - L_a| / L_a) \dots\dots\dots (2)$$

加えて, NEMA 法では 45 度以下の対角線を測定することを推奨し, 測定本数の増加に伴い精度も向上すると記載されているため, 最低測定本数を 4 本とし, 最大 64 本まで測定した.

歪みの少ない画像 (基準画像) と EPI で撮像した画像 (対象画像) に, ともに 45 度以下の対角線の長さを測定した. その測定本数を 4 本, 8 本, 16 本, 32 本, 64 本と増やしていき, 4 本測定の場合は隣の対角線とのなす角が 45 度, 8 本の場合は 22.5 度, 64 本の場合は 2.8 度に設定し, 対角線の長さを測定し上記 2 式より平均歪み率を算出し, それぞれの画像における歪み率とした.

3. 面積法による歪みの測定

基準画像と対象画像の差分処理を Image J を使用して行った. Fig. 2 に示すように, 差分画像において両画像の乖離した部分を測定者がフリーハンドで関心領域 (ROI) を設定し ROI 内の面積を測定した. すべての ROI 内の面積の和を基準画像の面積で除し, さらに 4 分の 1

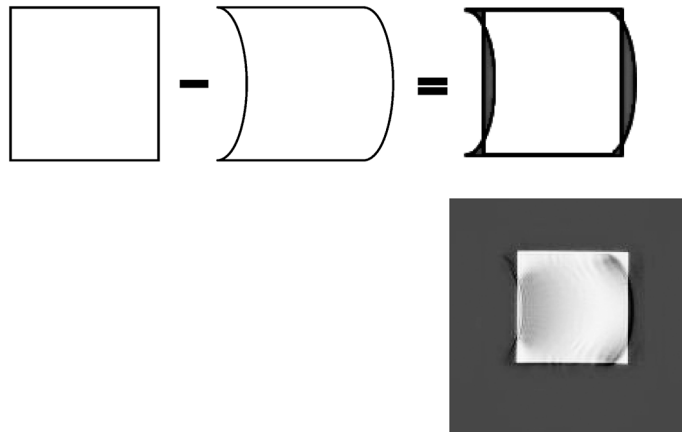


Fig. 2. The measurement method for the distortion ratio by the area method. The area different between criteria image and evaluation image was measured.

倍したものを歪み率とした。ここで、4分の1倍の係数を用いたのは、本研究においてNEMA法の数値と比較のために合わせるためであり、相対的な比較においては、この係数は必要ではない。

$$\text{Geometric distortion ratio} = \frac{\text{area}(\text{Shape}_{(1)} - \text{Shape}_{(0)})}{\text{area} \text{Shape}_{(0)}} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、Shape₍₁₎：対象画像，Shape₍₀₎：基準画像，area：面積

4. 計測時間の比較

NEMA法および面積法のそれぞれの計測を5人の評価者で1回ずつ行った。評価者は、放射線画像を日常的に扱う研究者で、年齢は21～56歳であった。評価者5人各々の各本数でのNEMA法と面積法の計測に要した時間を測定した。計測時間は、NEMA法では対角線を設定し線分の長さを測定後、計算により歪み率を算出するのに要した時間で、面積法では、差分処理を行い乖離した面積を測定して計算により歪み率を算出するのに要した時間とした。5人の評価者における各方法での評価時間について

Wilcoxonの符号付順位和検定によって有意水準0.05の有意差検定を行った。

5. 歪みの正当性の比較

RFOVの矩形率を50%，60%，70%，80%，90%，100%と変化させた場合の、両測定法における歪みを、下記式²⁾から求めた理想値と比較することによって、数値の正当性を比較した。

$$\text{EPIの歪み量} \propto \frac{\text{共鳴周波数の変化量}}{\{(\text{ESP} \times \text{Mp} \times 1 / \text{shot} \times \text{rectangle ratio of RFOV})\} \times (\text{FOV}/\text{Mp})}$$

ただし、ESP：Echo Space，MP：位相マトリックス，shot：ショット数，rectangle ratio of RFOV：長方形矩形率とする。

結 果

1. NEMA法の測定本数による歪率と面積法による歪率

NEMA法，面積法による歪率をFig. 3に示す。測定本数が4本の場合には、歪率が他の本数よりも有意に大きくなった (P<0.05)。逆に、8本では歪率の平均値がそれ以上の本数と

差分面積を用いた EPI の歪評価

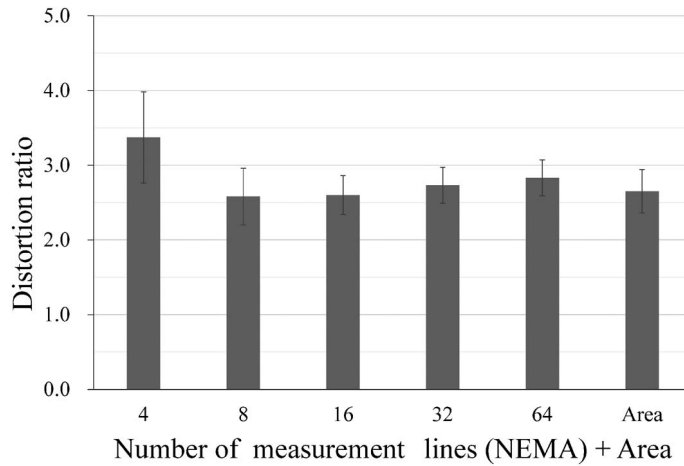


Fig. 3. The distortion ratios every line number of the NEMA measurement and of the area method. The numerical value of the distortion rate was stable from around 16 lines.

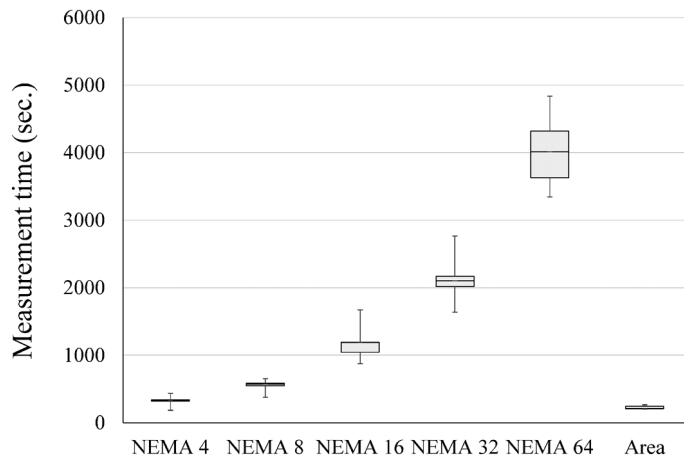


Fig. 4. Boxplots indicating the comparison of the measurement time of each evaluation method. The area method was significantly a short measurement time compared with the NEMA method.

比較し小さくなったが、有意差は見られなかった。加えて、5人の評価者による測定誤差（標準偏差）を、Fig. 3のエラーバーで示している。測定誤差は4本と8本がそれぞれ0.61, 0.38であった。16本以上で、測定誤差は0.26となり平均値ならびに測定誤差は安定した結果

となった。

2. NEMA法と面積法での測定時間の比較

NEMA法、面積法の測定時間をFig. 4に示す。歪率を測定するために要した時間は、測定本数4本のNEMA法で、5人の平均が5.5

分, 8本では平均9.5分, 16本で19.8分, 32本で33.5分, 64本では66.8分であったが, 面積法では3.5分であった. NEMA法ではすべての測定本数において, 面積法の測定時間を有意に上回った ($P < 0.05$).

3. RFOVの矩形率に対する理論的な歪率と各評価法での実測歪率の相関

Fig. 5に, RFOVの矩形率に対するNEMA法と面積法の実測の歪率の関係を示す. RFOVの矩形率に伴い, 歪率は理論通り減少した. ただしその減少率は, NEMA法での測定本数によって異なる結果となった.

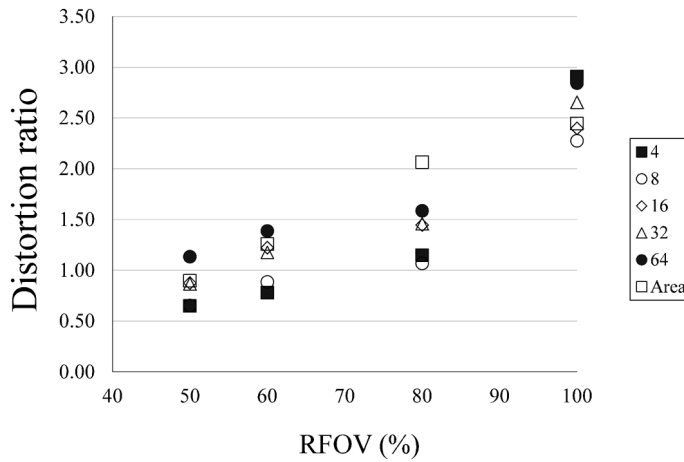


Fig. 5. The distortion ratios of the different rectangle ratio of RFOV

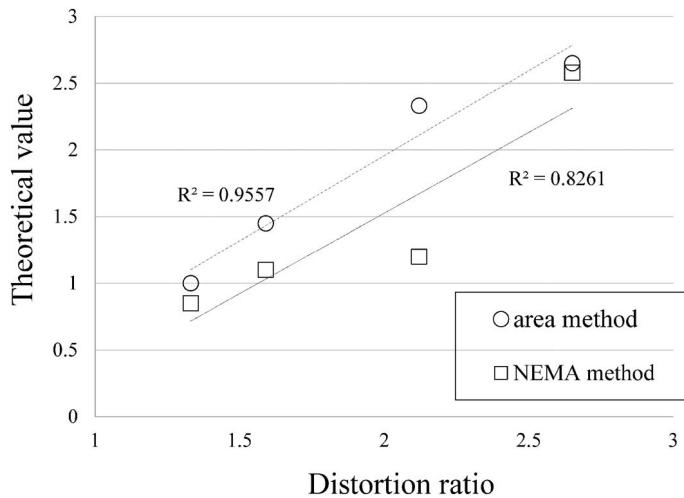


Fig. 6. Correlation of a theoretical value and the measurement value of the distortion ratio in case of eight lines for NEMA measurement and the area method

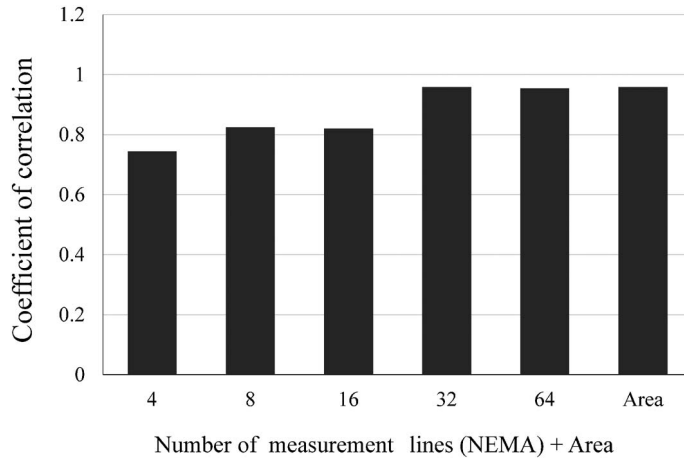


Fig. 7. Coefficient of correlation between the theoretical value with the area method and every measurement line numbers of NEMA method

RFOV の矩形率に対する理論的な歪率と NEMA 法の測定本数 8 本での歪み率と面積法の歪み率の相関を Fig. 6 に示す。相関係数は NEMA 法が 0.8261 で面積法は 0.9557 であった。RFOV の矩形率に対する理論的な歪率と NEMA 法の各測定本数および面積法での歪率との相関係数を Fig. 7 に示す。NEMA 法で 32 本以上の測定本数から相関係数は 0.9 以上を示した。

考 察

近年、MRI では様々な撮像シーケンスが開発される中で、画像歪の形状も複雑化されることが予想される。それらの歪を測定する方法として、性能評価を目的とした NEMA 法では精度の高い評価は困難である。複雑な形状の歪に対応するため、NEMA 法での測定本数を増加させ、各線分の歪値を平均化することによって歪み率は理想値に近づいた。今回の検討では、RFOV を使用した理論的な歪率との相関から、32 本以上の測定本数において、相関係数が 0.9 以上となった。測定本数の増加に伴い、設定角度や線分測定の誤差もあるが、平均化す

ることにより相殺されると考えられる。以上の結果より、EPI のような複雑に歪む形状の画像評価においては、NEMA 法では 32 本以上の測定本数が必要であると考えられる。一方、今回提案した面積法においては、理想値との相関係数が 0.9 以上であり精度高く歪を測定できていると考えられる。

また測定に要する時間は、32 本の測定本数での NEMA 法では平均 35 分を要したが、面積法では 3.5 分であった。NEMA 法は本数の増加に伴い、線分の設定が困難であり、またその長さ測定にも時間を要した。一方、面積法は、今回の研究では image J を使用したが、装置附属の差分処理でも対応可能であり、差分画像の不特定領域の面積測定も装置附属のソフトを使用すれば、さらに時間の短縮が計れる可能性がある。

面積法は測定時間も短く、理想値に近い評価を行うことができるため、撮像シーケンスに依存する歪みの評価に適していると考えられる。ただし、面積法は歪んでいる画像のどこまでを信号が存在する領域と判断するか、測定者の経験によって依存することが考えられる。また評価画像によっては、基準画像と同信号の領域や

信号強度のコントラストが弱い領域等, 乖離面積の測定が困難なこともある. 今回の画像においても, 差分画像より加算画像の方が乖離面積の同定が明確なケースがあった. そのため, 的確な閾値を設けるなどの手法で, 測定誤差を少なくすることが今後の課題として挙げられる. 加えて, 今回の研究では正方形のファントムで評価を行ったが, 例えば臨床画像のような複雑な形状のものに対応可能か否かは, 今後の検討課題としたい.

また, 基準画像としてSE法を使用しているが, これも全く歪がない画像ではないため, 比較的歪が大きなGRE法やEPI法の評価を目的として使用すべきである. 最後に, 面積法での基準画像は, 対象画像と同じマトリックスサイズに設定した方が, 表示画像サイズが同等となり, 差分処理が行いやすいことを注記しておく.

結 語

面積法は, 歪みの評価法として簡便さや精度の点において有用であるため, 今後新たな撮像法の評価や, コイル等のハード特性の評価にも使用可能と考える. 面積法による歪評価の今後

の新たな活用が期待される.

文 献

- 1) National Electrical Manufacturers Association : Determination of two-dimensional geometric distortion in diagnostic magnetic resonance images. NEMA Standards Publication, MS2. 2008
- 2) 高橋光幸, 小倉明夫, 尾崎正則, 他 : 拡散強調画像における歪の検討. 日放技学誌 2009 ; 65 : 1494-1501
- 3) 山口奈津美, 小倉明夫, 林 則夫, 他 : 偏重MPG三軸同時印加DWIの特性とADC値. 日放技学誌 2015 ; 71 : 595-604
- 4) 室 伊三男, 神谷 陽, 本田真俊, 他 : EPIにおける画像の歪に影響する撮像パラメータの検討. 日放技学誌 2007 ; 63 : 91-96
- 5) 武村哲浩, 笹本耕平, 仲村香織, 他 : 静磁場強度の異なる3機種を用いた脳定位放射線治療計画のためのMRI画像の歪み比較. 日放技学誌 2013 ; 69 : 641-647
- 6) 安田光慶, 加藤京一, 高橋俊行, 他 : 加算処理による腹部Diffusion image改善の方法. 日放技学誌 2009 ; 65 : 263-269
- 7) 中島浩樹, 上山 毅 : Gradient Echo型Multi-shot EPIを用いた2D-TOF下肢動脈撮像の検討. 日放技学誌 2012 ; 68 : 453-460

Using the Area Mismatch with SE Images to Evaluate the Distortion of EPI

Yohei KANEKO, Akio OGURA, Aoi KAMAKURA,
Tomoya KITAOKA

Saitama City Hospital
2460 Mimuro, Midori-ku, Saitama City, Saitama 336-8522

For evaluation of the distortion in a magnetic resonance (MR) image, the method recommended by the National Electrical Manufacturers Association (NEMA) is commonly used. However, the NEMA method is thought to be inadequate for evaluation of the distortion in an image when using various imaging techniques. Therefore, we devised a novel evaluation method for the distortion in MR images.

The novel evaluation method, called the area method, involves measurement of the size of the different areas in the criteria image and evaluation image. Using a 1.5T MRI device, the phantom, which is a square container filled with a nickel sulfate solution, was placed in air, and imaged. We obtained a proton density-weighted image using the spin-echo method as a criteria image without distortion and an echo planar image (EPI) as a target image with distortion. While obtaining the EPI, we changed the rectangular ratio of the rectangular field of view (RFOV) in order to change the degree of distortion.

For both the NEMA method and area method, the agreement with the theoretical value of the distortion rate for the rectangular rate of RFOV was compared. In the NEMA method, the dependence on the number for the measurement subject line was evaluated. In addition, the measurement time for each method was compared.

As a result, in the NEMA method, the number for the measurement subject line established in the NEMA method was stable in its result for 16 lines or more. In addition, the coefficient of correlation with the theoretical value became 0.9 or more number when the measurement subject line in 32 or more. Also, the measurement time for the NEMA method became significantly longer than that for the area method.

In conclusion, the area method is suitable for evaluation of distortion depending on the imaging sequence because it has a short measurement time and high measurement accuracy.