

連続講座

断層映像法の基礎 第11回 スピンエコー法のシミュレーション

篠原 広行¹⁾橋本 雄幸²⁾杉本 英治³⁾¹⁾ 東京都立保健科学大学 放射線学科²⁾ 横浜創英短期大学 情報処理学科³⁾ 昭和大学藤が丘病院 放射線科

はじめに

第10回は、MRIにおける2次元フーリエ変換法の画像再構成を具体的な計算機シミュレーションで示した。その中で、マトリックスの1点にのみ水素原子がある場合の2次元フーリエ変換法の計測データと再構成像、さらに、数値ファントムを用いた場合の計測データと再構成像を示した。

今回は、より実際の計測に近づけるために、スピンエコー法での計算機シミュレーションを行う。まずは、前回と同様にマトリックスの1点にのみ水素原子がある場合のスピンエコー法の計測データを示す。その際、緩和時間も考慮に入れる。また、そのデータから、2次元フーリエ逆変換により元の1点が再構成されることを示す。次に、数値ファントムを用いた場合の計測データと、それを2次元フーリエ逆変換で画像再構成を行った画像を示す。このとき、エコー時間や繰り返し時間を変えると、どのように再構成画像に影響するかもシミュレーションする。

1. 1点画像の計測と再構成
2. ファントムからの計測と再構成
3. パラメータを変えた場合の再構成

1. 1点画像の計測と再構成

スピンエコー法は、2次元フーリエ変換法と同じようにデータが取られる。2次元フーリエ変換法の計測は、計測用のコイルを90度ずらした位置に2つ置いて、実部の値と虚部の値に分けて計測する。 (x_0, y_0) に水素原子が強度 S_0 に相当する量だけ存在する場合の実部の計測値は、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_x x_0 t + G_y y_0 t_y)] \quad (1)$$

となり、虚部の計測値は、

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_x x_0 t + G_y y_0 t_y)] \quad (2)$$

となる。ここで、 γ は磁気回転比、 G_x および G_y は、それぞれ x 方向および y 方向へ印加する線形勾配磁場の強度を表している。 t_y は、 y 方向 (位相エンコード方向) へ線形勾配磁場を印加する時間を表している。この式は、緩和を考えないで信号を計測したことに相当する。通常は、**図1** に示すように静磁場の不均一性により T_2^* で緩和するFID信号となる。この T_2^* の緩和を考慮すると、実部の計測値は、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_x x_0 t + G_y y_0 t_y)] \cdot e^{-t/T_2^*} \quad (3)$$

となり、虚部の計測値は、

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_x x_0 t + G_y y_0 t_y)] \cdot e^{-t/T_2^*} \quad (4)$$

となる。

スピンエコー法の場合、**図1** に示すように 180° パルスを印加することにより、エコー時間 TE だけ過ぎたところにエコー信号が出る。そのエコー信号を計測する。エコー信号は、エコー時間 TE を中心として両側に T_2^* で緩和する形をしている。それを考慮した実部と虚部の計測値は、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_x x_0(t-TE) + G_y y_0 t_y)] \cdot e^{-|t-TE|/T_2^*} \quad (5)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_x x_0(t-TE) + G_y y_0 t_y)] \cdot e^{-|t-TE|/T_2^*} \quad (6)$$

となる。実際の計測は、エコー時間 TE の前後で行うが、**図1** に示すように信号は横緩和によって、 90° パルスを印加したところから e^{-t/T_2} だけ小さくなる。ここで、 T_2 は横緩和時間である。よって、横緩和を考慮した式は、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_x x_0(t-TE) + G_y y_0 t)] \cdot e^{-\lambda(t-TE)/T_2} \cdot e^{-t/T_2} \quad (7)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_x x_0(t-TE) + G_y y_0 t)] \cdot e^{-\lambda(t-TE)/T_2} \cdot e^{-t/T_2} \quad (8)$$

となる。さらに、図2に示すとおり、FID信号の初期強度は、繰り返し時間TRの間に縦緩和が完全に戻らないため $(1 - e^{-TR/T_1})$ だけ小さくなる。ここで、 T_1 は縦緩和時間である。よって、縦緩和を考慮すると、

$$s_{re}(t) = S_0(1 - e^{-TR/T_1}) \cos[\gamma(G_x x_0(t-TE) + G_y y_0 t)] \cdot e^{-\lambda(t-TE)/T_2} \cdot e^{-t/T_2} \quad (9)$$

$$s_{im}(t) = -S_0(1 - e^{-TR/T_1}) \sin[\gamma(G_x x_0(t-TE) + G_y y_0 t)] \cdot e^{-\lambda(t-TE)/T_2} \cdot e^{-t/T_2} \quad (10)$$

となる。

この計測値に実際の値を当てはめて、シミュレーションをする。磁気回転比 γ は水素原子核の場合、42.58MHz/T(テスラ)である。静磁場強度を1T(テスラ)とし、勾配磁場 G_x を0.12G(ガウス)/cmとする。1G(ガウス)は、 10^{-4} T(テスラ)である。水素原子の信号強度 S_0 は1とし、 (x_0, y_0) を(5cm, 3cm)に設定する。画像の視野を20cm正方で仮定し、画像の中心から(5cm, 3cm)のところに1点だけ水素原子が存在する場合を図で表すと図3のようになる。緩和時間は頭部白質のおおよその値に合わせて縦緩和時間 T_1 を510ms、横緩和時間 T_2 を67msとし、エコー時間TEを50ms、繰り返し時間TRを1000msする。また、静磁場の不均一性から起こる緩和 T_2^* を3msとすると、実部と虚部の計測値は、

$$s_{re}(t) = (1 - e^{-1/0.51}) \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times 5 \times (t - 0.05) + 3 \times G_y t)] \cdot e^{-\lambda(t-0.05)/0.003} \cdot e^{-t/0.067} \quad (11)$$

$$s_{im}(t) = -(1 - e^{-1/0.51}) \sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times 5 \times (t - 0.05) + 3 \times G_y t)] \cdot e^{-\lambda(t-0.05)/0.003} \cdot e^{-t/0.067} \quad (12)$$

となる。ここで、 $G_y t$ の位相エンコードであるが、x方向の勾配磁場の強度と計測のサンプリング間隔に合わせて、計測データが2次元フーリエ空間の正方格子に乗るように決める。計測を0.1msごとに行い、 t_y を1msとした場合、位相エンコードの勾配磁場 G_y は0.012G(ガウス)ごとに变化させる。これは、位相エンコードの度合いがサンプリングの間隔と対応するように設定するためである。計測のサンプリング点 k を、エコー時間TEのところを基準にして $\pm n/2$ の範囲としたとき、 $t = k \times 10^{-4} + 0.05$

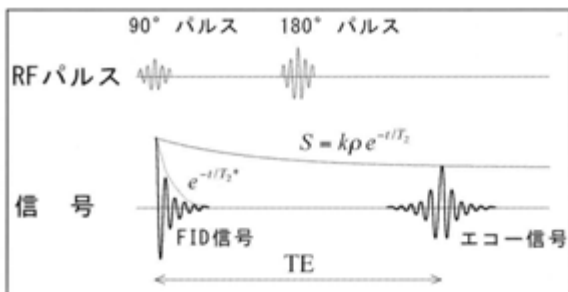


図1 スピンエコー法と横緩和の関係
計測されるエコー信号は、FID信号の起点から横緩和を受けて減衰する。

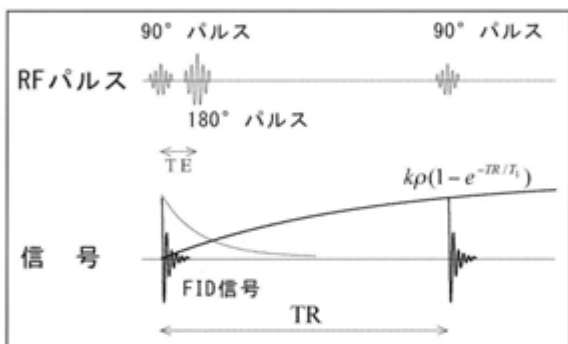


図2 繰り返しを含めたスピンエコー法と縦緩和の関係
FID信号のピークは、繰り返し時間TRの間回復した位置になるので、その分小さくなる。エコー信号は、そこからさらに横緩和の影響を受ける。

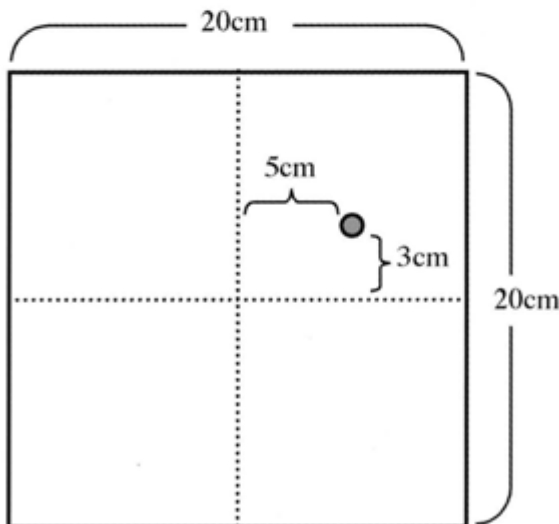


図3 画像上で、水素原子が存在する点を示している。画像の大きさは20cm正方で、水素原子は、(5cm, 3cm)の位置にある。

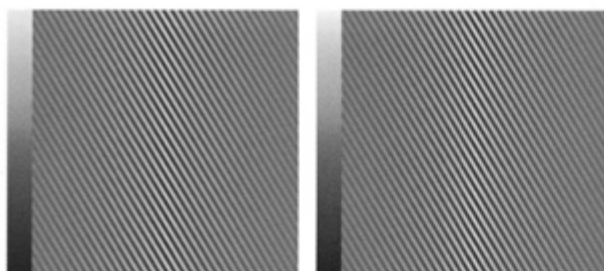


図4 計測の勾配磁場 G_x を0.12 G/cmとしたときの計測データの実部と虚部の画像

水素原子の信号強度 S_0 は1とし、サンプリング間隔は0.1 ms、水素原子が存在する1点の位置を(5cm, 3cm)に設定した。時間軸 k を横軸、位相エンコードの大きさである m を縦軸として、画像で表している。位相エンコードの大きさは、1msの間、0.012G/cmごとに印加している。また、縦緩和時間 T_1 を510ms、横緩和時間 T_2 を67msとし、エコー時間 TE を50ms、繰り返し時間 TR を1000msとしている。また、静磁場の不均一性による緩和時間 T_2^* を3msとしている。

(a) 実部の計測データ

(b) 虚部の計測データ



図5 図4の計測データをもとに再構成した結果の画像

2. 数値ファントムの計測と再構成

対象が1点ではなくて形状を持つ場合、各画素において水素原子の量に比例した強度、縦緩和時間 T_1 および横緩和時間 T_2 は固有の値を持つ。そこで、数値ファントムはその3つの固有値を持つことになる。ここで用いる数値ファントムの形状を図6(a)に、水素原子の量に比例した強度画像を図6(b)に、縦緩和時間 T_1 の画像を図6(c)に、さらに横緩和時間 T_2 の画像を図6(d)に示す。静磁場の不均一性から起こる緩和 T_2^* は3msと一定であるとする。画素数は128x128で、1辺は20cmとする。この数値ファントムの形状は、前回の第10回で用いたものと同じものである。

スピンエコー法でも数値ファントムの場合、計測される信号は、画像の各点から放出された信号の和となる。数値ファントムの各画素における強度分布を $S(i,j)$ 、縦緩和時間を $T_1(i,j)$ 、横緩和時間を $T_2(i,j)$ とする。計測の条件を1節で行ったシミュレーションと同様のものとし、実部と虚部の計測値を(9)式、(10)式に当てはめて書き直すと、

$$s_{re}(t) = \sum_{j=-64}^{64} \sum_{i=-64}^{64} S(i,j) (1 - e^{-1/T_1(i,j)}) \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times \{0.12 \times 10^{-4} \times \frac{20}{128} \times i \times (t - 0.05) + \frac{20}{128} \times j \times G_y t_y\}] \cdot e^{-\lambda - 0.05/0.003} \cdot e^{-t/T_2(i,j)} \quad (15)$$

$$s_{im}(t) = \sum_{j=-64}^{64} \sum_{i=-64}^{64} -S(i,j) (1 - e^{-1/T_1(i,j)}) \sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times \{0.12 \times 10^{-4} \times \frac{20}{128} \times i \times (t - 0.05) + \frac{20}{128} \times j \times G_y t_y\}] \cdot e^{-\lambda - 0.05/0.003} \cdot e^{-t/T_2(i,j)} \quad (16)$$

となる。ここで、 $S(i,j)$ 、 $T_1(i,j)$ と $T_2(i,j)$ の i と j は、128x128画素の数値ファントムの中心が(0,0)となるように画素に対応づけている。数値ファントムの128画素の1辺は20cmに相当しているので、実際の画素の位置は、それぞれ $20/128 \times i$ (cm)と $20/128 \times j$ (cm)になる。計測を0.1msごとに行い、 t_y を1msとし、位相エンコードの勾配磁場 G_y は0.012G (ガウス) ごとに変化させて計測すると、

となる。また、位相エンコードの変化の度合いを m として式に表すと、

$$s_{re}(k,m) = (1 - e^{-1/0.51}) \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times \{0.12 \times 10^{-4} \times 5 \times k \times 10^{-4} + 3 \times m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 10^{-3}\}] \cdot e^{-\lambda \times 10^{-4}/0.003} \cdot e^{-(k \times 10^{-4} + 0.05) \cdot 0.067} \quad (13)$$

$$s_{im}(k,m) = -(1 - e^{-1/0.51}) \sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times \{0.12 \times 10^{-4} \times 5 \times k \times 10^{-4} + 3 \times m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 10^{-3}\}] \cdot e^{-\lambda \times 10^{-4}/0.003} \cdot e^{-(k \times 10^{-4} + 0.05) \cdot 0.067} \quad (14)$$

となる。ここで、サンプリング点 k は $-n/2$ から計測数 $n/2-1$ までの整数値をとり、位相エンコードの度合い m は $n/2$ から $-n/2+1$ までの整数値をとる。計測の手順は、2次元フーリエ変換法と同様に行う。サンプリングを128点行い、それに合わせて位相エンコードを変えて取った計測データを図4(a),(b)に示す。この図では、 k を横軸、 m を縦軸にとって画像に表している。図4(a)が実部で、図4(b)が虚部である。画像に現れている波の向きは、原点から点源(5cm, 3cm)の方向を向いている。今回は緩和を考慮しているため、波の高さが中心から左右に向かって徐々に減衰している。

スピンエコー法では、計測データをそのまま2次元フーリエ逆変換すれば、画像再構成することができる。図4で示した計測データをもとに再構成した結果を図5に示す。1点が、元の位置に再構成されていることが分かる。

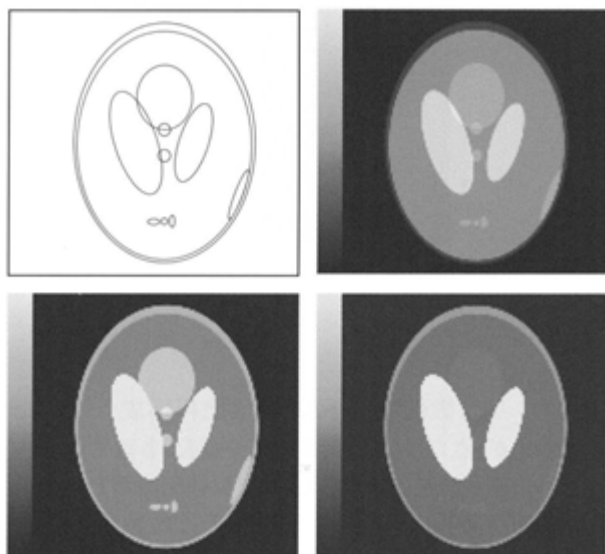


図6 数値ファントムの形状。画素数は128x128で、1辺は20cm。精円の組み合わせで作られている。

- (a) 数値ファントムの精円の構成図
 (b) 水素原子の量に比例した強度分布の画像
 (c) 縦緩和時間 T_1 の分布の画像
 (d) 横緩和時間 T_2 の分布の画像

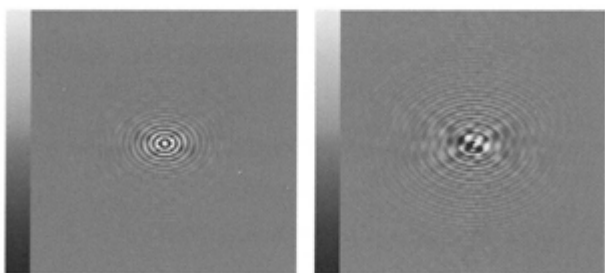
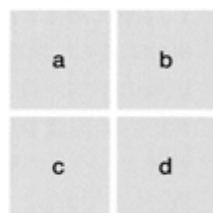


図7 計測の勾配磁場 G_x を0.12 G/cm、サンプリング間隔を0.1msとして、数値ファントムから作成したスピンエコー法の計測データの画像

時間軸 k を横軸、位相エンコードの大きさである m を縦軸として、画像で表したものを。エコー時間 TE を50ms、繰り返し時間 TR を1000msとしている。また、静磁場の不均一性による緩和時間 T_2^* を3msとしている。

- (a) 実部の計測データ
 (b) 虚部の計測データ

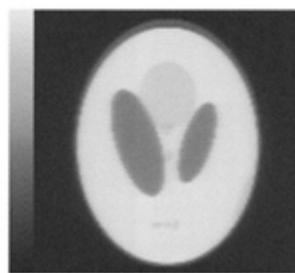


図8 図7の計測データをもとに再構成した結果の画像

$$s_{re}(k,m) = \sum_{j=-64}^{64} \sum_{i=-64}^{64} S(i,j) (1 - e^{-T_1(i,j)}) \cos[2\pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times \frac{20}{128} \times i \times k \times 10^{-4} + \frac{20}{128} \times j \times m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 10^{-3})] \cdot e^{-k \times 10^{-4} / 0.003} \cdot e^{-(k \times 10^{-4} + 0.05) / T_2(i,j)} \quad (17)$$

$$s_{im}(k,m) = \sum_{j=-64}^{64} \sum_{i=-64}^{64} -S(i,j) (1 - e^{-T_1(i,j)}) \sin[2\pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times \frac{20}{128} \times i \times k \times 10^{-4} + \frac{20}{128} \times j \times m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 10^{-3})] \cdot e^{-k \times 10^{-4} / 0.003} \cdot e^{-(k \times 10^{-4} + 0.05) / T_2(i,j)} \quad (18)$$

となる。ここで、 k はエコー時間 TE を基準としたサンプリング点を表し、 $-n/2$ から $n/2-1$ までの整数値をとり、 m は位相エンコードの大きさを表し、 $n/2$ から $-n/2+1$ までの整数値をとる。1点画像のときと同様に、この実部と虚部の計測データを、 k を横軸にとり、 m を縦軸にとって画像で表したものを、それぞれ図7(a),(b)に示す。

図7(a),(b)の計測データを元に、2次元フーリエ逆変換を用いて再構成した結果を図8に示す。再構成された画像は、水素原子の量に比例した強度、縦緩和時間 T_1 および横緩和時間 T_2 の3つ固有値と計測の際のエコー時間 TE 、繰り返し時間 TR が関係し合った画素値を示している。

3. パラメータを変えた場合の再構成

水素原子の量に比例した強度、縦緩和時間 T_1 および横緩和時間 T_2 の3つの値は、被写体固有のものであるので変えることはできないが、計測時のパラメータであるエコー時間 TE と繰り返し時間 TR は変えることができる。エコー時間と繰り返し時間を TE と TR としたときの計測データは、

$$s_{re}(k,m) = \sum_{j=-64}^{64} \sum_{i=-64}^{64} S(i,j) (1 - e^{-TR/T_1(i,j)}) \cos[2\pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times \frac{20}{128} \times i \times k \times 10^{-4} + \frac{20}{128} \times j \times m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 10^{-3})] \cdot e^{-k \times 10^{-4} / 0.003} \cdot e^{-(k \times 10^{-4} + TE) / T_2(i,j)} \quad (19)$$

$$s_{im}(k,m) = \sum_{j=-64}^{64} \sum_{i=-64}^{64} -S(i,j) (1 - e^{-TR/T_1(i,j)}) \sin[2\pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times \frac{20}{128} \times i \times k \times 10^{-4} + \frac{20}{128} \times j \times m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 10^{-3})] \cdot e^{-k \times 10^{-4} / 0.003} \cdot e^{-(k \times 10^{-4} + TE) / T_2(i,j)} \quad (20)$$

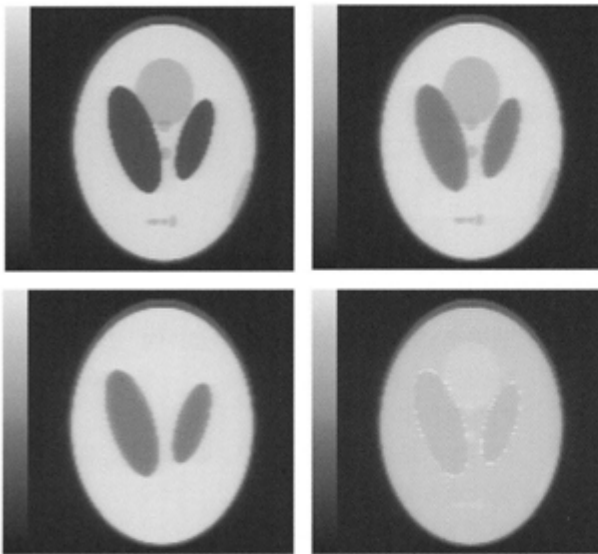


図9 エコー時間TEと繰り返し時間TRを変えて再86構成した結果の画像

- (a) TE=20ms、TR=250ms
 (b) TE=80ms、TR=250ms
 (c) TE=20ms、TR=2000ms
 (d) TE=80ms、TR=2000ms

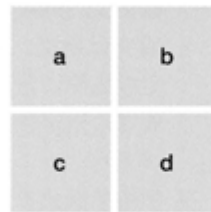


図10 第2エコーのRFパルスと信号のシーケンス

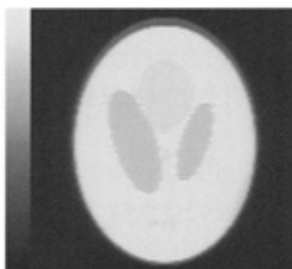


図11 TE=50ms、TR=1000msとしたときの第2エコーから再構成した結果の画像

となる。TEを20、80ms、TRを250、2000msにした場合の再構成した画像を図9に示す。TE=20msでTR=250msの画像は、T1強調画像を指している、TE=80msでTR=2000msの画像は、T2強調画像を指している。

90°パルスの後に180°パルスを印加して得られるエコー信号を第1エコーと呼ぶ。最初の180°パルスを印加してから時間TE後にもう一度180°パルスを印加して得られるエコー信号を第2エコーと呼ぶ。そのRFパルスと信号のシーケンスを図10に示す。第2エコーでは、横緩和による減衰が、時間TEの分だけ増えるので、横緩和による影響が+TEから+2TEとなる。よって、計測データは、

$$s_{re}(k,m) = \sum_{j=-64}^{64} \sum_{i=-64}^{64} S(i,j) (1 - e^{-TR/T_1(i,j)}) \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times \frac{20}{128} \times i \times k \times 10^{-4} + \frac{20}{128} \times j \times m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 10^{-3})] \cdot e^{-k \times 10^{-4} \times 0.003} \cdot e^{-(k \times 10^{-4} + 2TE)/T_2(i,j)} \quad (21)$$

$$s_{im}(k,m) = \sum_{j=-64}^{64} \sum_{i=-64}^{64} -S(i,j) (1 - e^{-TR/T_1(i,j)}) \sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times \frac{20}{128} \times i \times k \times 10^{-4} + \frac{20}{128} \times j \times m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 10^{-3})] \cdot e^{-k \times 10^{-4} \times 0.003} \cdot e^{-(k \times 10^{-4} + 2TE)/T_2(i,j)} \quad (22)$$

となる。TEが50ms、TRが1000msのときの第2エコーを再構成した画像を、図11に示す。

謝辞：本稿で使用したプログラムの開発は、東京都立保健科学大学特定プロジェクト研究「生体内可視化技術に関する教育研究支援プログラムの開発」によるものである。

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619