



会期：2009年4月19日  
会場：パシフィコ横浜会議センター

## MRIにおける信号強度の基本特性

土井 司

大阪大学医学部附属病院

### A Basic Characteristic of Signal Intensity in MRI

Tsukasa Doi

Osaka University Hospital

#### 緒 言

良い画像とは、MRIに限らずどの場合にも目的とする情報が的確に描出されている画像だと定義できる。その場合、一般的に画質が良い(ざらつきが少ない: SNRが高い), コントラストが高い(組織間に濃度差がある), 鮮銳度が高い(シャープに見える), 解像度が高い(細かいところまで見える: 分解能が高い)ことが良い画像の条件である。画像の良し悪しの基準を一概には言えないが、MRIや核医学で得られる画像は、これらの条件のすべてが満たされて撮像法や撮像条件が決定されるものではなく、組織コントラストとノイズのみに注目して「描出能が高い」「視認率が高い」という評価によって撮像条件が決定されることも多い。目的とする情報に注目して評価する場合には、いろいろな要素が入り混じった評価となり従来の物理評価とは一線を画している。しかしながら、個々の撮像因子を検討する場合には、その条件でのSNRやCNRを高めるための撮像条件を選択しなければならない。

以上のことから、特に環境要因の高い1)クロストークアーチファクト, 2)パーシャルボリューム効果, 3)高速SE(fastSE)画像の信号強度, 4)3T装置のフィールドエリア内のコントラストの四つの項目について、描出能を決定する信号強度や画像コントラストなどをSNRやCNRを指標として評価した。

使用装置は、GE社製Signa HDx 3.0Tである。

#### 1. クロストークアーチファクト (cross-talk artifact)

クロストークアーチファクトとは、マルチスライス撮像を行うときに起こる隣り合うスライス間で起こる干渉のことをいい、スライスプロファイルの辺縁が重なっていると、一つのスライスを励起するための

Radio Frequency (RF)パルスによって隣のスライスのプロトンも励起されSNRが低下する現象である。

##### 1-1 スライスプロファイルの測定

目的のスライスのみを選択するためには特定の周波数のみを励起する必要がある。しかし、現実には時間制限があるので有限のサイドローブを持つsinc形のRFパルスが照射される。そのため本来矩形となるスライスプロファイルの形状は、裾野を持つ鳥帽子型となっている<sup>1)</sup>。その裾野の広がりと重なりが各スライスのSNRにどのように影響しているのかを検討した。

##### 1-1-1 方法

硫酸銅溶液に満たされた円筒形ファントム内に取り付けられた直径0.75, 2, 4mmの3種のアクリルピンに対して、スピニエコー(spin echo: SE)法にてアクリルピンがスライス幅の中心部に存在するときから撮像位置が中心から離れて、そのピンが画像として認識できなくなるまで0.5mm間隔で撮像位置を移動させて撮像した(Fig. 1a)。スライスプロファイルが悪いといわれているFLAIR法では、シングルスライスとスライスギャップ1mmで7枚のマルチスライスの撮像も行った。撮像条件は、T1shortSE法: TR 300ms, TE 12msのシングルスライス、T2fastSE法: TR 4000ms, TE 100ms, ETL 7, スライス枚数7, スライスギャップ4mm, T1FLAIR法: TR 2500ms, TE 12ms, TI 1000ms, ETL 3, スライス枚数1 & 7である。

CNRは次式にて求め評価を行った<sup>2)</sup>。

$$CNR = \sqrt{\frac{(SD_T)^2 - (SD_{BG})^2}{(SD_{BG})^2}} \quad \dots \quad (1)$$

##### 1-1-2 結果

Fig. 2にスライス厚4mmで撮像位置を0.5mmずつ移動させて撮像したときに得られた画像を示す。撮

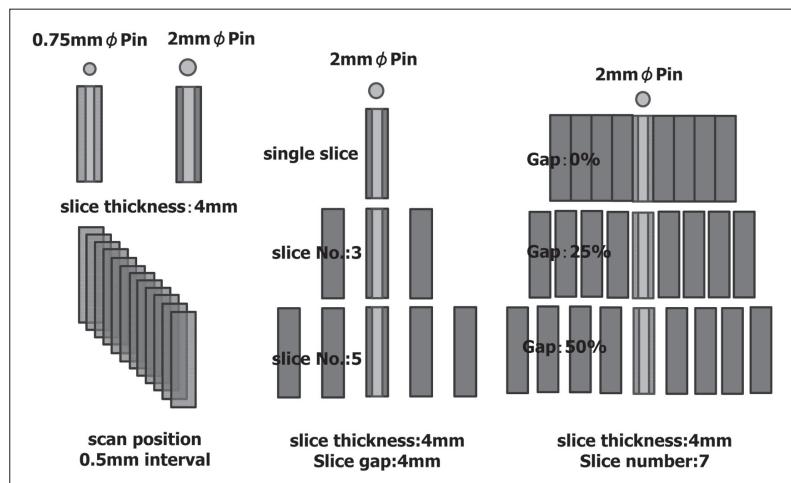


Fig. 1 Measuring method of appearance ability of the pin.

Relation between subject and slice position.

(a) Cross-talk: The scan position is moved by 0.5 mm interval and the pin is fixed.

(b) Relation between slice number and SNR.

(c) Relation between slice gap and SNR.

a | b | c

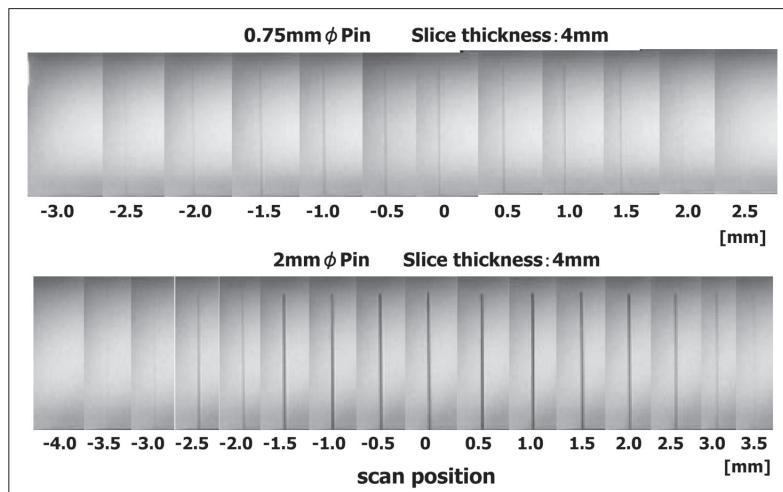


Fig. 2 This image moved an slice position by 0.5 mm at slice thickness

4 mm and imaged a pin interval at slice thickness 4 mm.

The slice profile measured CNR of this image.

The upper section: The 0.75 mm diameter pin, Lower section: 2 mm diameter pin.

像中にピンがあると明瞭に描出されるが、ピンの中心から撮像位置がずれるに従って不明瞭になった。上段の0.75mm径のピンに比べて、下段の2mm径のピンの方が直径が大きいので、描出される範囲も広くなっている。得られた画像のCNRをプロットするとスライスプロファイルが得られ、被写体が大きいピン径4mmの中心部のCNRが最も高く、2mm径でその約1/3、0.75mm径で約1/8になった(Fig. 3a)。半値幅で表されるスライス厚は、SE法では設定値とほぼ同じ値の4mmであったが、FLAIR法では4.5mmと少し厚くなったり(Fig. 3b)。4mm径のピンが被写体のときは中心から6mm外れたところまで、2mm径のときは5mm

まで、0.75mm径のときは4mmまでピンを検出できた。FLAIR法をマルチスライス法にすると、半値幅がわずかに広がり全体にCNRが上がった。

## 1-2 スライス枚数とスライスギャップに対する信号強度

スライス厚とスライスギャップが固定でスライス枚数(RFパルスの照射回数)を変化させたとき(Fig. 1b)と、スライス枚数が固定でスライスギャップを変化させたときの、スライスの中心にあるピンの検出能を検討した(Fig. 1c)。

CNRは(1)式を、コントラストは次の(2)式を用

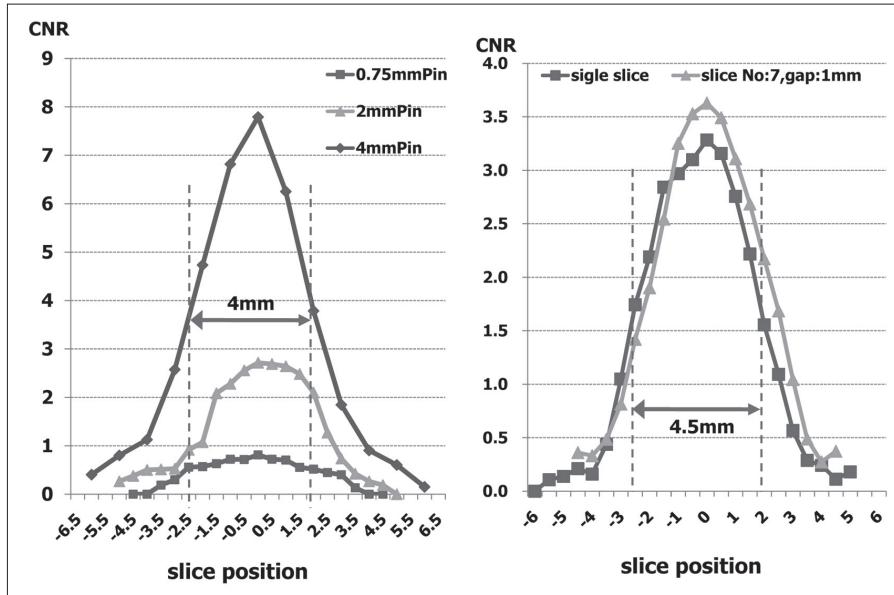


Fig. 3 Relation between slice position (slice profile) and CNR.  
 (a) Spin echo: TR 300 ms, TE 12 ms, slice thickness 4 mm, single slice.  
 (b) FLAIR: TR 2500 ms, TE 12 ms, TI 1000 ms, ETL 3, slice thickness 4 mm.

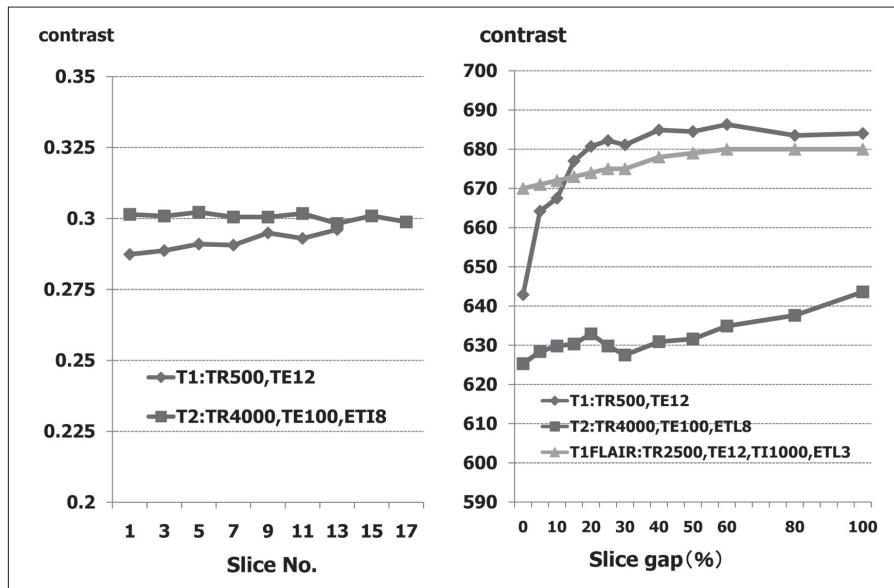


Fig. 4 A slice gap and the slice number and relations of the contrast.  
 (a) Subject: 2 mm $\phi$ Pin, slice thickness 4 mm, slice gap 4 mm fixed, change the slice number.  
 (b) Subject: 2 mm $\phi$ Pin, slice thickness 4 mm, slice number 7 fixed, change the slice gap.

いた。

$$\text{Contrast (1)} = \text{SI}_T - \text{SI}_{BG} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

### 1-2-1 方法

スライス厚 4mm, スライスギャップ 4mm(100%)を一定として, 中心にくるスライスの中央に 2mm径のピンを設定し, スライス枚数を 1 枚から 17 枚まで変化させ, その CNR とコントラストを測定した。

また, スライス厚 4mm, スライス枚数 7 枚を一定として, スライスギャップを 0~100%まで変化させ, その中心になるスライスのピンの CNR とコントラストを測定した。

### 1-2-2 結果

T2fastSE 法ではスライス枚数が増えても CNR とコ

ントラストの値に変化はなかったが, T1shortSE 法ではスライス枚数が増えると, 双方ともに徐々に上昇した (Fig. 4a)。

スライス枚数が固定でスライスギャップを変化させると, CNR は変化しないが, コントラストは T1shortSE 法だとスライスギャップが 0 から 30% に広がるに従って急激に上昇し, T2fastSE 法と FLAIR 法ではギャップが大きくなるに従って徐々に上昇した (Fig. 4b)。

### 1-3 考察

被写体のピン径 4mm とスライス厚 4mm というようにピン径とスライス厚が同じ場合のスライスプロファイルは, 補野が約 12mm と 3 倍に広がった。被写体が

スライス厚より小さくなると、パーシャルボリューム効果のためCNRが低下する(2. 参照)が、スライスプロファイルで測定される半値幅であるスライス厚はほぼ正確に求められた。スライスプロファイルの足の部分は、ピンの径が大きくなるに従って長くなった。また、FLAIR法はスライスプロファイルが悪いので、クロストークの影響をなくすためにマルチスライスのとき4倍のインターバル撮像を行っていると言われている。マルチスライスのときにCNRが上昇したのは、RFパルスをたくさん与えているため信号強度が上昇したのだと考えるが、スライスプロファイルの形状にほとんど変化がなく、4倍のインターバルスキャンの効果が出ていると思う。

スライス枚数が増えると、RFパルスの照射回数が増えるのでSNRが低くなることを予想した。結果は逆になり、スライス枚数が増えるとT1shortSE法ではわずかにコントラストが上昇した。原因として、RFパルスの照射間隔が短いと、信号が回復するまでに次のパルスが照射されるため信号が上昇したのだと考える。

スライスギャップについては、予想どおりスライスギャップが大きくなるほどコントラストが上昇した。しかし、T2fastSE法やFLAIR法では徐々に上がる傾向だったのに対して、T1shortSE法では、スライスギャップが30%まで急激に上昇し、それ以上はほぼプラトーになった。スライスプロファイルの足の部分が長いT2fastSE法やFLAIR法と足部分の短いT1shortSE法の違いが出たのだと考える。

## 2. パーシャルボリューム効果 (partial volume effect)

ボクセル内やスライス厚内に異なる組織が存在するときに、それぞれの組織の信号が入り混じった信号強度となる。ボクセル内(スライス厚)に含まれる他組織が占める割合によって信号強度が決定されるが、MRIの場合にはSNRとの兼ね合いを考慮する必要がある。

### 2-1 小被写体とマトリクスの関係

FOV256mm、マトリクス256×256で撮像したとき、マトリクスサイズは1辺が1mmになる。そのとき、1mm径のピンが一つのマトリクスのちょうど中心に位置したときのマトリクスごとの信号強度を測定すると、一つ外側のマトリクスに少し影響を与えるものの中心の一つのマトリクスのみの信号強度が大きく低下した。また、ピンが二つのマトリクスに均等にまたがって位置する場合には、信号の低下するマトリクスが二つになりその信号強度は先ほどの65%程度の低下に留まった<sup>1)</sup>。

### 2-2 スライス厚とピンの描出能

#### 2-2-1 方法

スライス厚の中心に0.75mm径、1mm径、2mm径、4mm径のピンを設定し、スライス厚を1mmから12mmまで変化させたときのピンの描出能をコントラスト(2)式とCNR(1)式にて評価した。撮像条件は、shortSE法: TR 300ms, TE 12ms, single slice, NEX 1, 256×256である。

#### 2-2-2 結果

1mm径のピンをスライス厚を変えて撮像したときの画像をFig. 5に示す。スライス厚11mmで撮像したときも1mm径のピンを視認できた。Fig. 6aのグラフで4mm径のピンをスライス厚1mmで撮像したときのコントラストが760で最大だった。スライス厚10mmで1mm径のピンを撮像したときのコントラストが75で約1/10になり、4mm径のピンをスライス厚12mmで撮像したときには230となり最大のコントラストの約1/3になった。また、4mm径の最大のコントラスト値から1/3の値になる約250が、1mm径のピンの1/3に相当するスライス厚3mmのときの値が同じになった。

コントラストがスライス厚の最も薄いときに最大になるのに比べて、CNRは最大にはならずに、ピン径とほぼ同じスライス厚のときに最大になった。また、CNRはピン径の4倍のスライス厚まで急激に低下するが、それ以上は低下がゆるやかになった(Fig. 6b)。

### 2-3 考察

ピクセルサイズの小さな被写体の信号強度にも、被写体の位置によってパーシャルボリューム効果が起こるので、小さな被写体の信号強度を測定して画像を評価するときには注意が必要である。二つのマトリクスの半分ずつにまたがる場合の信号が最初の65%に留まったのは、今回の被写体が円柱のピンだったため、厳密には四角であるマトリクスのすべてを埋めることにはならなかったので信号強度が50%にならなかったのだと考える。

被写体径がスライス厚の1/10であっても高コントラストなら十分視認することができた。被写体が小さくなるとコントラストは低下したが、そのコントラストの変化率はいずれのピン径であっても同様であり、スライス厚に対する被写体が占める割合でコントラストが同じになることが分かった。例えば、0.75mm径のピンをスライス厚2mmで撮像したときに示すコントラスト値140は、1mm径のピンがスライス厚6mmのコントラストと同じなので、スライス厚に対するピンの存在比率が約17%になっていると考えることができる。

被写体が小さいとそのコントラストがより低下する

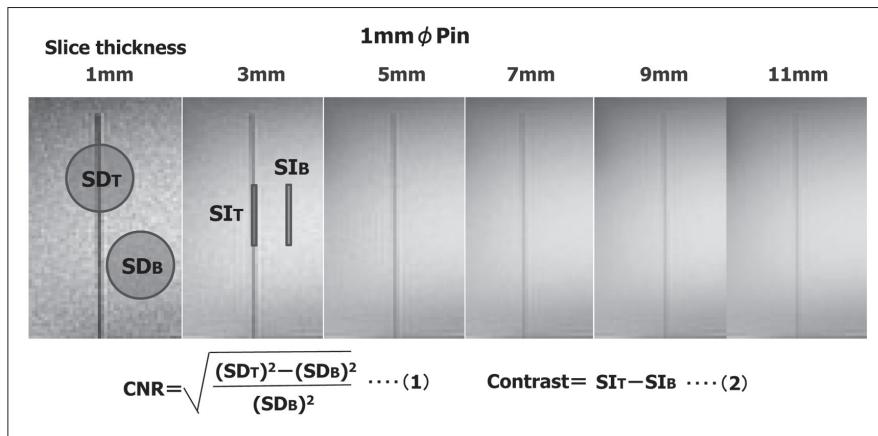


Fig. 5 Partial volume effect: I change a slice thickness and image the pin of 1 mm diameter. I used the CNR metrology of expression (1) when subject was small. I used and regularized the image contrast metrology of expression (2) when the signal changed greatly.

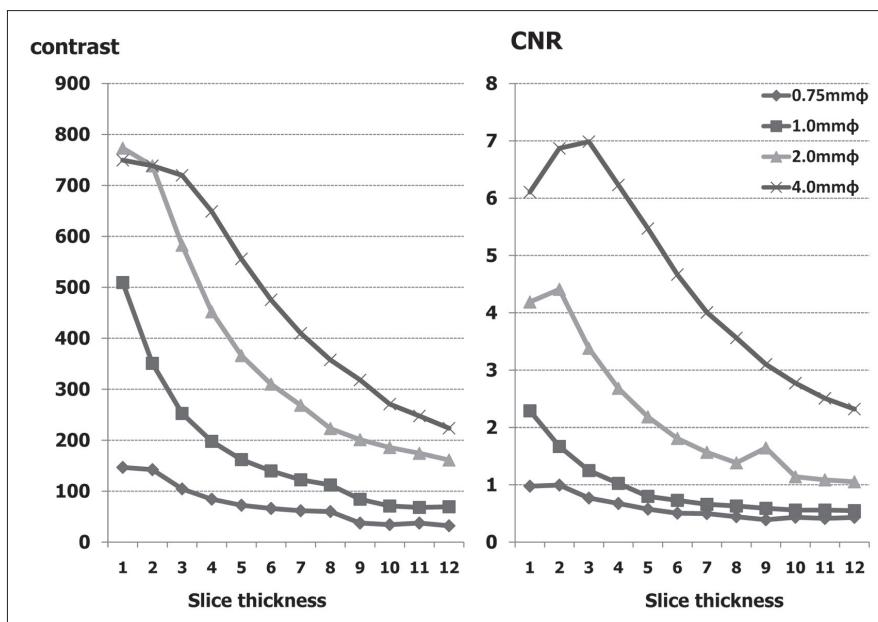


Fig. 6 Evaluation of partial volume effect (TR 300 ms, TE 12 ms, single slice, NEX 1, 256×256).  
 (a) Relation between slice thickness and image contrast.  
 (b) Relation between slice thickness and CNR.

のは、被写体が円形であることと、信号検出能が低くなったり場合にはノイズが増大し直線関係が失われているからだと思う。Fig. 6bにおいて、スライス厚1mmでCNRが低下しているのは、スライス厚が薄くて信号強度差よりもノイズの方が大きく影響したためである。したがって、小さい被写体を撮像するときは薄いスライス厚がCNRに有利であり、大きい被写体の場合にはノイズが逆に作用する場合もあるので、スライス厚5mm程度なら小さな被写体であっても高コントラストなら十分に検出できるので、視認率を上げるためにスライス厚を必要以上に薄くするのは逆効果であると考える。

### 3. 高速スピニエコー(fastSE)画像の信号強度

T2fastSE法の高速化のために使用する180°パルスは、画像にいろいろな影響を与えコントラストが変化すると言われている。その原因と根拠を検証すること

を試みた。

実験は、脳組織と等価の0.125mMのGd希釈溶液の中に水とGd:0.25mM希釈溶液、Gd:0.5mM希釈溶液、バター、サラダ油、洗剤の6種の溶液を封入した自作ファントムを下記の条件にて撮像した(Fig. 7)。

#### 3-1 磁化遷移(magnetization transfer: MT)効果

数100Hzのバンド幅を持った先行飽和パルスを自由水の共鳴周波数から1000~2500Hz離れた周波数に照射すると、広い周波数帯域に存在する短いT2値を持つ高分子化合物内の水分子を飽和させる。しかし脂肪の信号は、MTパルスによって感知されるほど変化しないので相対的に信号強度が上昇すると言われている<sup>3)</sup>。

##### 3-1-1 方法

T2fastSE法: TR 4500ms, TE 120ms, BW 31.25kHzでETL 16を一定としてスライス数を1~29に変化させ

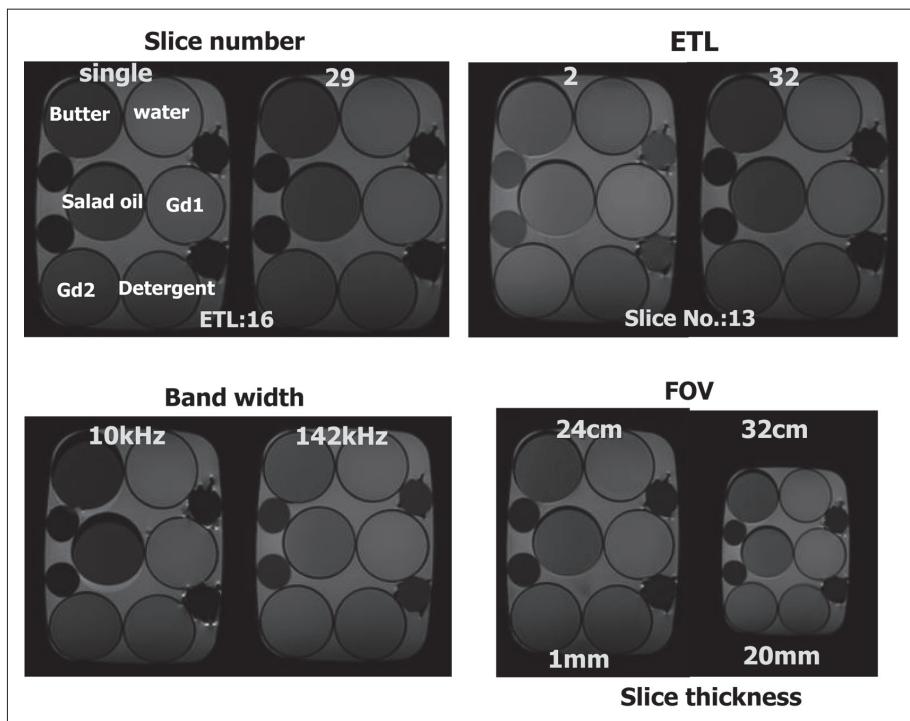


Fig. 7 This images was scanned by fastSE method. I measured the signal intensity of each organization with the each effect.  
 (a) Magnetization transfer effect: slice number and signal intensity.  
 (b) Magnetization transfer effect: ETL and signal intensity.  
 (c) J-coupling: band width and signal intensity.  
 (d) Diffusion: FOV, slice thickness and signal intensity.

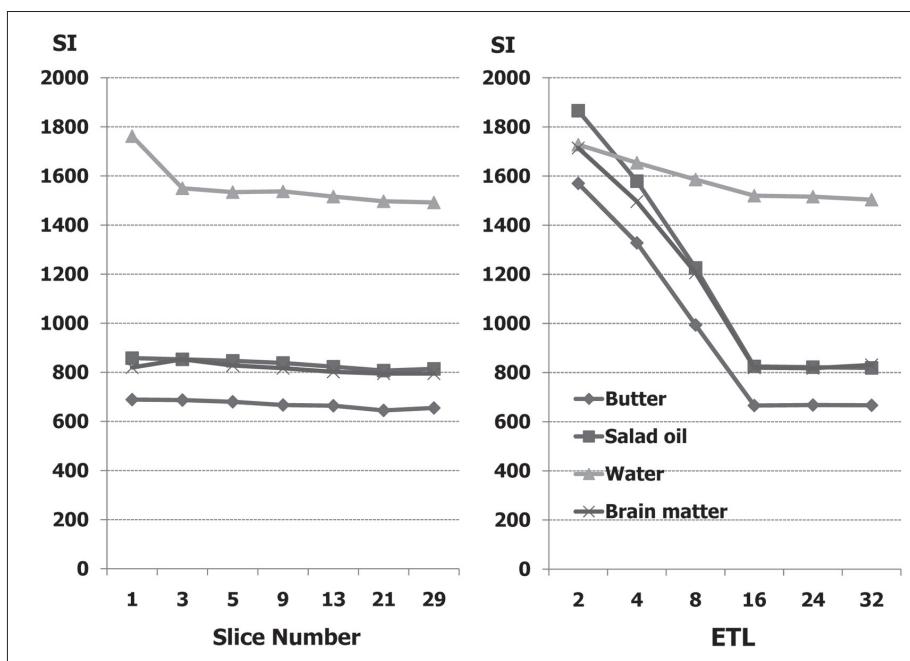


Fig. 8 Scan technique: TR 4500 ms, TE 120 ms. BW 31.25 kHz, ETL 16.  
 (a) Magnetization transfer effect: Relation between slice number and signal intensity.  
 (b) Magnetization transfer effect: Relation between ETL and signal intensity.

たときと、スライス数 13枚を一定としてETLを 2~32に変化させたときの各組織の信号強度を測定した。

### 3-1-2 結果

ETLが一定でスライス数が増えると、水の信号のみがわずかに低下するだけで、他の組織の信号強度はさらにわずかな信号強度の低下だった(Fig. 8a)。

スライス数が一定でETLが16まで増えると、サラダ油とバター、脳等価組織の信号強度が最初の 1/2に

なったが、それ以上にETLが増えても信号強度に変化がなかった。水もETL 16まではわずかに低下したが、それ以上はほとんど変化がなかった(Fig. 8b)。

### 3-2 J-結合 (J-coupling)

180°パルスを短い間隔で多数回照射するfastSE法では、プロトンが静磁場と同じ向きになる状態と逆向きになる状態に留まる時間が短縮されて平均化された

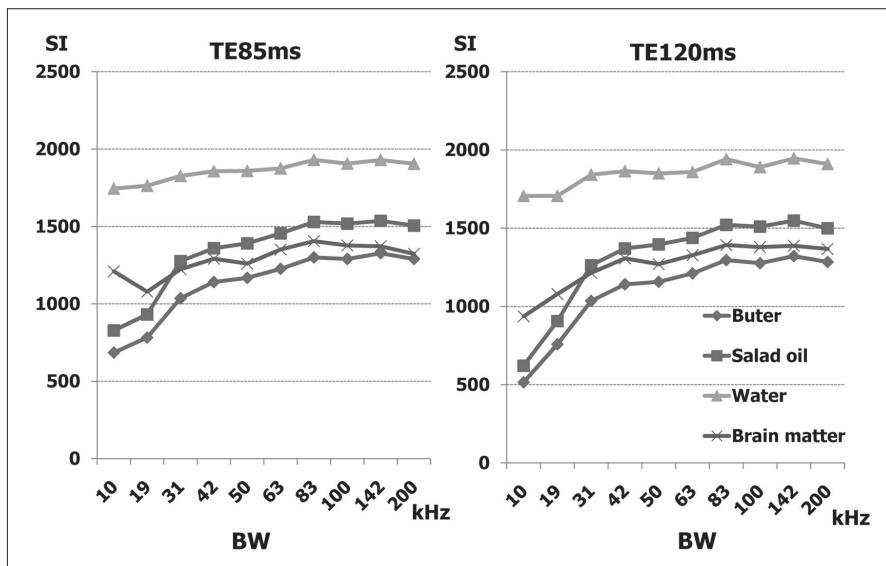


Fig. 9 fastSE method, Scan technique: TR 4500 ms, ETL 8, single slice. J-coupling: Relation between band width and signal intensity. (a) TE 85 ms, (b) TE 120 ms

結果、spin-spin結合の効果がなくなるdecouplingが起こる。このことが原因で、中性脂肪のプロトンのT2が短くなり脂肪信号が低下しにくいと言われている<sup>4)</sup>。

### 3-2-1 方法

180°パルス間隔を変化させるために、純粹にecho spaceのみを変化できればよいのであるが、ETLを一定としてsingle sliceでバンド幅を変えてその代用とした。

### 3-2-2 結果

バンド幅が狭いといずれの組織の信号強度も低下し、広くなるに従って信号強度が上昇する傾向だった。サラダ油はバンド幅が狭いとバターと同程度に信号が低いがバンド幅：31kHzを超えると脳等価組織よりも信号が高くなった。TEが長くなるほど、その傾向は顕著だった(Fig. 9)。

### 3-3 拡散 (diffusion)

プロトンが拡散によって動くとすると、傾斜磁場によって起こる位相の変化はT2短縮効果として表れる。それは、傾斜磁場強度の2乗と傾斜磁場内をスピンが移動する時間の3乗に比例すると言われている<sup>5)</sup>。

### 3-3-1 方法

傾斜磁場の強さと各組織の信号強度の関係を測定するために、スライス厚1mm、FOV 240mmの組み合わせからスライス厚とFOVを同時に大きくし、それにはかかる傾斜磁場の強さを変化させたときのそれぞれの組織の信号強度を測定した。また、拡散強調のb値を変化させたときのそれぞれの信号強度を測定した。

### 3-3-2 結果

傾斜磁場が強くなると、いずれの組織もわずかであるが信号が上昇した(Fig. 10a)。拡散強調像のb値：50で信号強度の最も高いのが脳等価組織、次いで水、サラダ油、バターの順であった。b値が上がるに従ってそれぞれの信号強度は低下するがb値：1500付近ですべての組織の信号強度が接近し、b値：2000を超えると、サラダ油=脳>水=バターとなりb値の低いときに比べて信号強度が逆転した。サラダ油は、b値が低いときもそれほど信号は高くないが、b値が高くなても信号強度が低下しなかった(Fig. 10b)。

### 3-4 考察

MTC効果は、スライス枚数ではなくETLが最も影響を与えていたことが分かった。その結果、水の信号がより強調されることが検証された。ETLが16以上になると信号の低下が止まるのは、高分子化合物と結合したプロトンがすべて飽和してしまうためと思われる。しかし、脂肪は水と分かれて存在するので影響を受けないとされているが<sup>3)</sup>、ここで用いたサラダ油では信号が同じように低下してしまった。

J-結合について、小倉らはバンド幅を一定(130kHz)に最大スライス枚数で実験を行った結果、echo spaceが短くETLが長くなる程、T2値が延長することを導いている<sup>6)</sup>。ここでは、echo spaceが短くなると脂肪以外の組織の信号強度が低下することを予測して、シングルスライス、ETL 8一定にてバンド幅を10～200kHzまで変化させて各組織の信号強度を測定した。しかしながら、バンド幅が10～30kHzと広がるに従って脂肪の信号がより上昇し、decouplingが徐々に

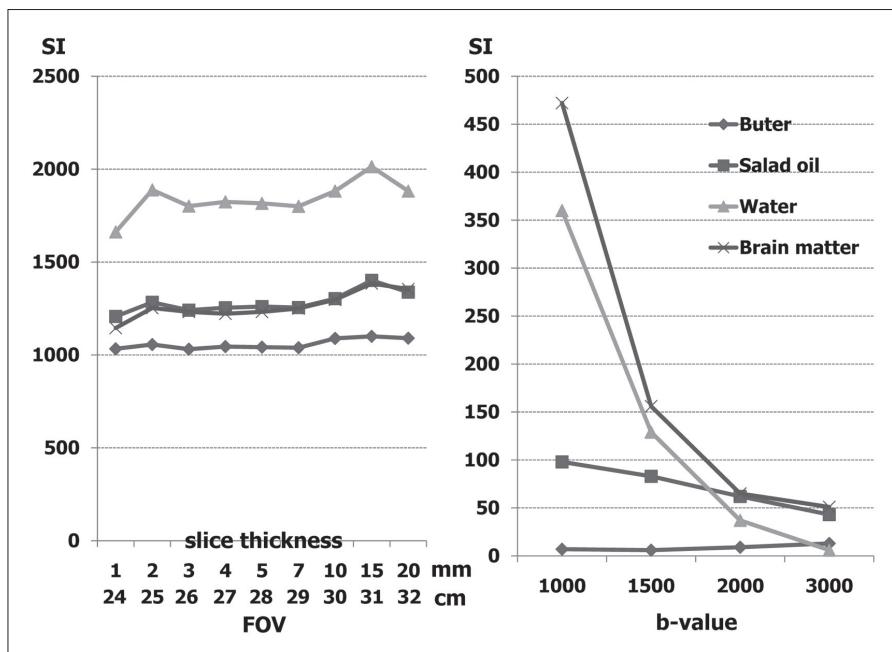


Fig. 10 Diffusion: change of signal intensity into the magnetic gradient and b-value.  
 (a) Change of signal intensity into FOV and slice thickness.  
 Scan technique: TR 4500 ms, TE 120 ms, BW 31.25 kHz, ETL 8.  
 (b) Relation between b-value and signal intensity.

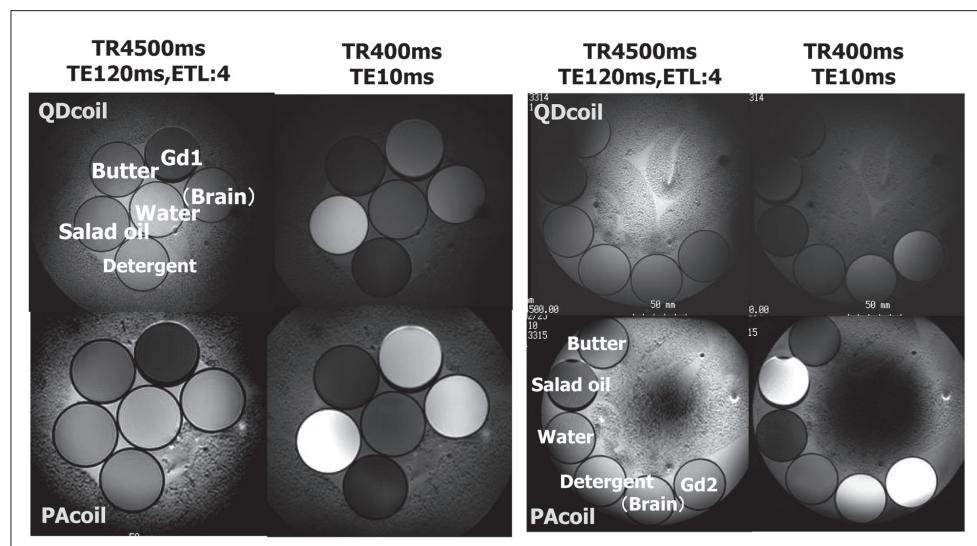


Fig. 11 Signal intensity of each organization by difference between kind of coil and subject position.

The upper section: quadrature coil, Lower section: phase array coil.

(a) Phantom images when there is subject in central portion.  
 (b) Phantom images when there is subject in peripheral zone.

a | b

解除されていく過程だと思われる信号変化を確認できただけで、echo spaceの影響を厳密に追究することはできなかった。

拡散強調像での脂肪の信号強度は、T2 shine throughの影響がなくなるb値: 1000でも脳等価組織や水の1/4程度しかないものの、b値2000を超えても信号が低下しないので脳組織や水の信号強度と逆転した。これは、脂肪の粘稠度がmotion probing gradient (MPG)パルスの影響を常に受けにくいのだと考える。

以上のことから、脂肪の信号などT2強調像の信号強度はMTC効果、J-coupling、diffusionの影響をそれぞれが複雑に受けて信号強度が決められていることが分かった。

#### 4. 3T装置の撮像エリア内の画像コントラスト

撮像領域内の磁場やコイル感度が不均一であれば画像コントラストも変わる。1.5T装置でクアドラチャ (quadrature: QD)コイルを用いるとほぼ均一な感度

Table 1 Signal intensity and standard deviation, signal noise ratio of each phantom when scanning with PA coil and QD coil

When subject is in the central area

	TR	TE	BW	ETL	0.125 mM			+Gd1			Water			Salad oil		
					SI	SD	SNR	SI	SD	SNR	SI	SD	SNR	SI	SD	SNR
phased array	4500	85	125	4	5657	63.2	89.5	5896	72.2	81.7	5073	84.4	60.1	4061	65.7	61.8
		125	125	4	5599	69.1	81.0	5928	54.2	109.4	5048	91.9	54.9	4072	64.8	62.8
QD coil	400	10	31.3	1	1134	36.6	31.0	3278	108.6	30.2	736	83.5	8.8	2914	64.7	45.0
	4500	85	125	4	1164	32.4	35.9	760	54.4	14.0	956	23.5	40.7	557	41.1	13.6
		125	125	4	1160	33.2	34.9	793	57.1	13.9	980	26.5	37.0	568	37.9	15.0
	400	10	31.3	1	393	16.9	23.3	531	32.3	16.4	225	10.4	21.6	473	29.1	16.3

When subject is in the peripheral area

	TR	TE	BW	ETL	0.125 mM			+Gd1			Water			Salad oil		
					SI	SD	SNR	SI	SD	SNR	SI	SD	SNR	SI	SD	SNR
phased array	4500	85	125	4	4518	425	10.6	4363	442.3	9.9	4028	285.3	14.1	3349	384.5	8.7
		125	125	4	4397	410.9	10.7	4331	436.8	9.9	3903	295.8	13.2	3370	378.3	8.9
QD coil	400	10	31.3	1	1498	33.3	45.0	3053	301.8	10.1	597	54.3	11.0	876.1	75.4	11.6
	4500	85	125	4	669	70.1	9.5	609	66	9.2	443	47.5	9.3	116	41.9	2.8
		125	125	4	672	68.2	9.9	590	64.3	9.2	469	49.5	9.5	151	49.9	3.0
	400	10	31.3	1	238	19	12.5	464	57.6	8.1	81	8.3	9.8	63	16.5	3.8

The upper section: when there is subject in central portion.

The lower section: when there is subject in peripheral zone.

マップが得られていた。その後、受信感度を上げ高速撮像(parallel imaging)を可能にするために導入されたフェイズドアレイ(phased array: PA)コイルには、コイルに依存する感度不均一があり、それを均一化補正技術によって撮像領域内の信号強度は均一になった。しかし、3T装置が出現するとRFパルスによる定在波や浸透力によって撮像領域の中心部の信号強度が上昇する現象がでてきた。そこで、3T装置の中心部と辺縁部、そしてコイルの違いによる各組織の信号強度やコントラストの変化を検討した。

## 4-1 方法

直径20cmの円柱形のタンクの中に脳組織と等価の0.125mMのGd希釈溶液を満たし、その中にGd:0.25mM希釈溶液、Gd:0.5mM希釈溶液、バター、サラダ油、洗剤の6種の溶液を封入した直径4cmの円柱形ファントムを中央部に置いたときと辺縁部に置いたときのQDコイルとPAコイルで撮像した画像の各組織のSNRとCNRを測定した(Fig. 11)。撮像条件は、T2強調像：TR 4500msでTE 85msとTE 125ms、T1強調像：TR 400ms、TE 10msとし、SNRは次の(3)式を、CNRは(4)式を使って求めた。

$$\text{SNR} = \text{SI}_T / \text{SD}_T \quad \dots \quad (3)$$

$$\text{CNR} = \text{SNR} (1) - \text{SNR} (2) \quad \dots \quad (4)$$

## 4-2 結果

T2強調像において、PAコイルの辺縁部の信号強度は中心部に比べて25%減少し、SDは7倍になった。T1強調像ではサラダ油以外はほとんど差がなかった。QDコイルのT2強調像、T1強調像では、ともに辺縁部の信号強度が $50\sim80\%$ 低下し、SDが $1.5\sim2$ 倍になった(Table 1)。

SNRは、0.25mM Gd溶液にその差が顕著に表れ、中心部ではPAコイルのSNRはQDコイルに比べてT1強調像で約3~4倍、T2強調像で約2.5倍であり、辺縁部のSNRは、PAコイルの方がQDコイルの約2~3倍であった。中心部と辺縁部のSNRを比較すると、PAコイルでのT1強調像で約9倍、T2強調像で約3.5倍になり、QDコイルではT1・T2強調像ともに約1.5倍中心部のSNRが高かった。他の溶液では、これほどには差がつかないが、おおむねこのような傾向にあつた。

使用コイルとファントムが置かれた場所の違いによるSNRは、それぞれの条件で測定した0.125mM溶液の標準偏差を使ってSNRを求ることで正規化を

行った。その結果、PAコイルの中心部でQDコイルの約2倍のSNRがあった。PAコイルの場合の辺縁部のそれぞれの組織のSNRは、T2強調像の中心部の12~16%になるのに対し、T1強調では上回る組織や50%程度に低下する組織もあった。QDコイルのT2強調像では30~50%に、T1強調像では20~30%に低下し、中心部より上回った組織はなかった。

「脳等価組織-サラダ油」「脳等価組織-水」「脳等価組織-希釈造影剤」のCNRを比較した(Fig. 12)。いずれも中心部の方のCNRが高く、辺縁部に比べて2~3倍高くなかった。PAコイルとQDコイルを比べると、中心部では平均的にPAコイルのCNRの方が高くなつたが、辺縁部のT2強調像ではほとんどコントラストが得られていないことが分かった。

#### 4-3 考察

今回の検討では、parallel imagingや画像均一化補正処理を施していないので、本来のコイルの感度分布と磁場不均一が評価できたと考える。SNRはQDコイルに比べてPAコイルがすべてに優れていたが、中心部と辺縁部のSNRの差はQDコイルよりも大きく表れた。PAコイルでは、辺縁部のSNRが高く中心部のSNRが低くなることを予測していたが、結果的にそうはならなかった。PAコイルでも中心部の信号強度の方が辺縁部よりも高くなることから、定在波や浸透力によって中心部と辺縁部の差が少なくなっているのだと思う。辺縁部のSNRの低下は、SDの増加が大きくなることが原因で、感度よりも磁場の不均一が大きく影響しているのだと考える。QDコイルの信号強度は、PAコイルに比べて辺縁部の方が中心部に比べて約1/2になるもののSDは約2倍に抑えられているので、計算上のSNRはPAコイルに比べて中心部に対する辺縁部の低下率が低くなつた。このことより、QDコイルの方が中心部と辺縁部の感度差があり、SNRの均一度はPAコイルよりQDコイルが優れていることが分かった。また、T1強調とT2強調の信号強度の強さがコイルの感度に応じてSDも変化するので、T1強調では信号が弱くなつてもSDが悪くならずSNRが上がつたのだと考える。

各組織間のコントラストは、中心部にファントムがあるときには予測どおりの結果となつたが、辺縁部に

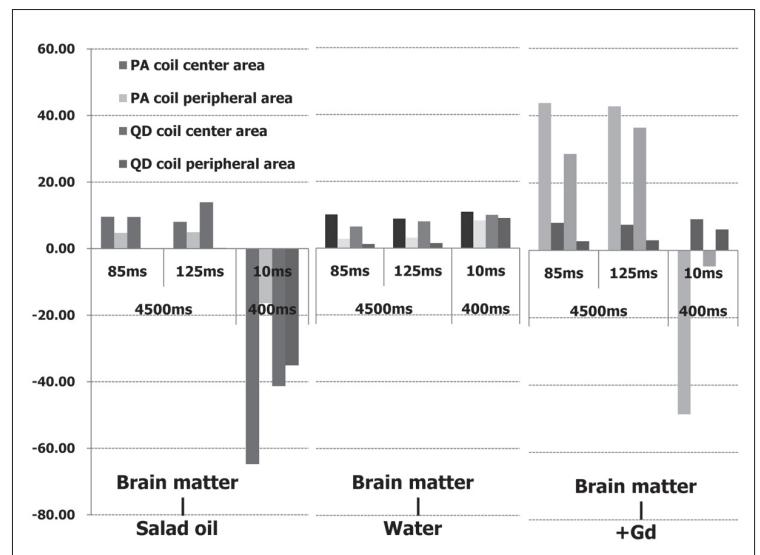


Fig. 12 Image contrast between each organization when phantom are in central portion and peripheral zone.

ファントムがあるときにはコントラストが不確かなものとなり、なかには予測と反転するものもあった。それは視覚的にも明らかで、感度とSD、特に磁場均一度の悪化が信号強度をも狂わせているように思う。

#### 5. まとめ

画像の信号強度は、クロストークの影響、パーシャルボリューム効果、撮像シーケンスによる特性、使用コイルの感度特性、撮像領域の位置依存性による信号感度など、さまざまな因子を受けて信号強度が決定されている。それぞれが、どのような状況で影響を及ぼしあっているのかをある程度実験で検証することができたが、まだまだ解明できていない部分も多く課題は残されている。少なくとも、得られた画像がどのような条件下で得られているのかを、常に考慮しながら画像を解析する必要がある。

#### 謝 辞

今回、名誉ある宿題報告者としてこのような機会を与えていただきました小寺学会長はじめ学術委員会の皆様に深謝いたします。また、従来のような歴史の重みと将来展望を報告するような内容でなく、私の興味ある超基本的な分野を話させていただいたにもかかわらず発表時には十分まとめきれていませんでした。本文は、再度、解析を行い加筆修正をしています。

## 参考文献

- 1) 土井 司, 水野吉将. MRIにおけるパーシャルボリュームによる信号強度の変化. 日放技学誌 1998; 54(10): 1200-1206.
- 2) 土井 司. 7.2. 臨床画像の評価法. 放射線技術学シリーズ「MR撮像技術学」. 日本放射線技術学会, 京都, 2001: 272-273.
- 3) Santyr GE. Magnetization transfer effects in multislice MR imaging. Magn Reson Imaging 1993; 11(4): 521-532.
- 4) Henkelman RM, Hardy PA, Bishop JE, et al. Why fat is bright in RARE and fast spin-echo imaging. J Magn Reson Imaging 1992; 2(5): 533-540.
- 5) Allen D. Elster, Jonathan H Burdette 著, 荒木 力 訳. MRI「超」講義 第2版. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2003: 43-44.
- 6) 小倉明夫, 石黒秋弘, 木村哲哉, 他. 高速SE撮像における撮像パラメータとj-couplingとMT-effectの相対的関係. 日放技学誌 2001; 57(8): 933-938.

## 図表の説明

Fig. 1 ピンの描出能の測定: 被写体(細いピン)とスライスの関係
   
(a)クロストーク: 位置を固定させたピンを0.5mmずつスキャン位置をずらして撮像
   
(b)スライス枚数とSNRの関係
   
(c)スライスギャップとSNRの関係

Fig. 2 スライス厚4mmで撮像位置を0.5mmずつ移動させてピンを撮像したときの画像
   
この画像のCNRを測定してスライスプロファイルとした.
   
上段: 0.75mm径ピン, 下段: 2mm径ピン

Fig. 3 スライス位置(スライスプロファイル)とCNRの関係
   
(a) Spin echo: TR 300, TE 12, slice thickness 4mm, single slice
   
(b) FLAIR: TR 2500, TE 12, TI 1000, ETL 3, slice thickness 4mm

Fig. 4 スライスギャップおよびスライス枚数とコントラストの関係
   
(a)被写体: 2mmΦPin, slice厚: 4mm, slice gap: 4mm固定, スライス枚数: 変化
   
(b)被写体: 2mmΦPin, slice厚: 4mm, slice No.: 7枚固定, スライスギャップ: 変化

Fig. 5 パーシャルボリューム効果: 1mm径のピンをスライス厚を変化させて撮像
   
CNR測定法: (1)の全体測定法(被写体が小さいとき)
   
コントラスト測定法: (2)信号強度差を強調するため

Fig. 6 パーシャルボリューム効果の評価: TR 300, TE 12, single slice, NEX 1, 256×256
   
(a)スライス厚とコントラストの関係
   
(b)スライス厚とCNRの関係

Fig. 7 高速スピニエコー法によって撮像された各組織の信号強度を測定した実験画像
   
(a) Magnetization transfer効果: スライス枚数と信号強度
   
(b) Magnetization transfer効果: ETLと信号強度
   
(c) J-結合: バンド幅と信号強度
   
(d) 拡散: FOV, スライス厚と信号強度

Fig. 8 TR 4500ms, TE 120ms, BW 31.25kHz, ETL 16
   
(a) Magnetization transfer効果: スライス枚数と信号強度の関係(スライス枚数が増えるとわずかに信号強度が低下する).
   
(b) Magnetization transfer効果: ETLと信号強度の関係(ETLが増えると水以外の信号強度が急激に低下する).

Fig. 9 fastSE法: TR 4500ms, ETL 8, single slice
   
J-結合: バンド幅と信号強度の関係(バンド幅が広がるに従って信号強度が上昇する)
   
(a) TE 85ms, (b) TE 120ms

Fig. 10 拡散: 傾斜磁場とb値に対する信号強度の変化
   
(a) FOVとスライス厚に対する信号強度の変化: TR 4500ms, TE 120ms, BW 31.25kHz, ETL 8(傾斜磁場が強くなるとわずかに信号強度が上昇する).
   
(b) b値と信号強度の関係(b値が高くなてもサラダ油の信号強度は低下しない).

Fig. 11 コイルの種類と被写体位置による各組織の信号強度
   
上段: QDコイル, 下段: PAコイル
   
(a)中心部に被写体があるときのファントム画像
   
(b)周辺部に被写体があるときのファントム画像

Fig. 12 ファントムが中心部にあるときと周辺部にあるときの各組織間のコントラスト

Table 1 PAコイルとQAコイルでファントムを撮像したときの各測定値
   
上段: 中心部に被写体があるとき, 下段: 周辺部に被写体があるとき