原 著

ゼラチンとスクロースを用いた拡散強調画像用ファントムの検討

田村隆行^{1, 2)}・笛吹修治³⁾・秋山實利³⁾論文受付
2009年 5 月13日論文受理
2009年 8 月27日

Code No. 261

1) 広島原爆障害対策協議会健康管理増進センター放射線科
2) 広島国際大学大学院医療・福祉科学研究科医療工学専攻
3) 広島国際大学保健医療学部診療放射線学科

緒 言

頭部や体幹部に対する拡散強調画像(diffusion weighted image: DWI)の応用が急速に広がり、急性期脳梗塞や悪性腫瘍を含めた病変の検出に用いられ、臨床的に有効性を示す報告が数多くなされている^{1~4)}。これらの画像を物理的、客観的に評価する場合、ファントムでの検討は重要と考えるが、DWIのコントラストや検出能に対して、臨床的検討は多くなされているものの、ファントムを使用した物理的評価の報告は少ない。これは、臨床を模擬するような見かけの拡散係数(apparent diffusion coefficient: ADC)を持つファントムを安定して作成することができないこ

とによると考えられる。

過去に、Laubach⁵⁾らは、ゼラチンとスクロースを用い、急性期の脳梗塞を模擬したファントムを開発しており、ゼラチンやスクロースの濃度を変えることで、ADCをある程度コントロールすることに成功している。しかし、ADCを低下させると、同時に緩和時間も短縮するため、この方法ではT2値を揃えて、任意のADCのファントムを作成するのは困難である。そこで、本研究では、ゼラチン、スクロースおよび緩和剤として塩化マンガンを用いて、ADCおよびT2値を個別にコントロールしたファントムの作成について検討したので報告する。

Investigation of a Phantom for Diffusion Weighted Imaging That Controlled the Apparent Diffusion Coefficient Using Gelatin and Sucrose

Takayuki Tamura,^{1, 2)} Shuji Usui,³⁾ and Mitoshi Akiyama³⁾

1) Department of Radiology, Hiroshima Atomic Bomb Casualty Council, Health Management & Promotion Center

2) Major in Medical Engineering and Technology, Graduate School of Medical Technology & Health Welfare Sciences, Hiroshima International University

3) Department of Clinical Radiology, Faculty of Health Science, Hiroshima International University

Received May 13, 2009; Revision accepted August 27, 2009; Code No. 261

Summary

When studying diffusion weighted imaging (DWI), it is important to create a phantom that has a reliably controlled diffusion coefficient. In this study, we investigated phantoms to control both the diffusion coefficient and the T2-value by changing the concentration of gelatin or sucrose and MnCl₂, respectively. The results showed that the diffusion coefficient decreased linearly with increases in the gelatin or sucrose concentration, and decreasing of their relaxation times was observed. By properly adjusting the MnCl₂ concentrations, we were able to equalize the T2-values between phantoms having different gelatin or sucrose concentrations. Temperature dependence of the diffusion coefficient was also revealed. This phantom can be made stable for a few months by adding a small amount of NaN₃ as an antiseptic agent, has a diffusion coefficient similar to that of neural tissue or clinical tumor, and is able to control the T2-value properly. We consider this phantom suitable for studying SE-type DWI and contributes to elucidation of this technique.

Key words: diffusion weighted imaging, phantom, gelatin, sucrose, apparent diffusion coefficient別刷資料請求先: 〒730-0052 広島市中区千田町3丁目8-6
広島原爆障害対策協議会 健康管理増進センター放射線科 田村隆行 宛

1. 方 法

1-1 試料の作成

試薬ゼラチン(SIGMA G2500 Type A ~300 Bloom), および試薬スクロース($C_{12}H_{22}O_{11}$, 和光純薬)を、濃度が10~50wt%まで10wt%ずつ変化するように精製水に加熱溶解した(以下、ゼラチンゲル、スクロース溶液)。さらに、スクロース溶液は液体でありファントムとして取り扱いが不便であるため、10wt%ゼラチンを加えゲル化したものも作成した(以下、スクロースゲル)。緩和時間をコントロールするため、ゼラチンゲル、および、スクロースゲル10~40wt%の試料にはそれぞれ、塩化マンガン($MnCl_2$, 和光純薬)を~0.3mM加え、総量50gのファントムをサンプル管瓶にて作成した。また、ファントムには防腐剤として、アジ化ナトリウム(NaN_3 , 和光純薬)を0.01wt%濃度になるように添加した。

1-2 ゼラチン濃度、スクロース濃度、塩化マンガン濃度と緩和時間の関係

作成したファントムをMRI装置(Philips社製MRI装置 Gyroscan INTERA Achiva 1.5T Power R2.6 : Netherlands)にて、T1値をFast Inversion Recovery : FIR法(TR 5000ms, TE 10ms, ETL 5, Matrix : 256×256, FOV 200×140mm, Thickness 5mm, NSA 1, TI 50~1000ms)で、T2値をMulti echo FSE法[TR 5000ms, TE 15~225ms (15echo), ETL 15, Matrix : 256×256, FOV 200×140mm, Thickness 5mm, NSA 1]で撮像し、得られた緩和曲線から最小二乗法を用いて求めた。

1-3 DWIの信号強度変化とADCの算出

作成したファントムの拡散強調画像を上記のMRI装置において以下の条件にて撮像した。

撮 影 条 件 : SE型Single Shot EPI with Spectral Presaturation with Inversion Recovery (SPIR) : TR 7000ms, TE 100ms, Matrix : 128×128, FOV 270×189mm, Thickness 10mm, Half scan factor 0.6, b-value : 0~3000(250step) s/mm², Gradient over plus⁶⁾ Yes, NSA 9. 使用コイル : QD HEAD Coil.

それぞれの試料の中心付近に、縦11×横 8 Pixelsの楕円形のROIを設定し、その信号強度を測定、b値に対してプロットし、次式(1)にて最小二乗法にてカーブフィッティングを行い、ADCを求めた⁷⁾。

$$S_i = S_0 \exp(-b \cdot ADC) \quad \dots\dots\dots (1)$$

S_0 : b=0のときの信号強度

S_i : b値をかけたときの信号強度

b : b値

1-4 拡散計測時間とADCの関係

これらのファントムの拡散が低下する原因として、水分子の構造化、粘調度の上昇などによる自己拡散自体の低下と、自己拡散はそのまま、何らかの物理的な障害物の出現により水分子の動きが制限される制限拡散の影響が考えられる⁷⁾。これらの違いは、拡散計測時間を変化させることによりある程度判別できる。つまり、一般に拡散現象における平均二乗変異は、

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

D : 拡散係数

t : 拡散時間

と表される⁷⁾が、もしここで、何らかの構造物などによって拡散する範囲が制限されている(制限拡散)なら、拡散時間を延長した場合、平均二乗変異が頭打ちとなって、結果、測定される拡散係数は低下すると考えられる。DWIにて拡散するプロトンの磁化の減衰率 Ψ は、そのときのmotion proving gradient (MPG)の印加強度をg, 印加時間を δ , またその間隔を Δ とすると、

$$\Psi = \exp\left[-\gamma^2 D \delta^2 g^2 \left(\Delta - \frac{1}{3}\delta\right)\right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

γ : 磁気回転比

D : 拡散係数

にて表されることが知られている⁸⁾。実際の臨床機では、

$$(\gamma \delta g)^2 \left(\Delta - \frac{1}{3}\delta\right) = b \quad \text{値として任意に選択できるが、}$$

g, δ , Δ の個別なコントロールは不可能である。しかし、当センターの装置では、b値を固定してTEを延長させるとgがなるべく低くなるように設定されるため、自ずと δ , Δ が変化し、結果、拡散計測時間が延長する。これを利用し、塩化マンガンを添加していない各濃度のゼラチンゲル、およびスクロース溶液にて、TEを74ms(最短)~200msまで変化させることにより、間接的に拡散計測時間を変化させることによるADCの変化を観察し、拡散低下の原因を調べた。

1-5 ファントムの温度とADCの関係

今回作成したゼラチンファントムの温度とADCの関係を知るために、各ゼラチン、スクロース濃度で塩化マンガンを添加していないものを冷蔵庫で冷却し、冷蔵庫から取り出して室温24°Cに設定したMR検査室内でファントムが常温になるまで温度計(T & D社製 Thermo Recorder TR-71U : Japan)でモニタしながらDWI撮像を行い、各温度でのADCを算出した。また、この測定は3回繰り返しを行い、温度とADCの関係について最小二乗法にて直線フィッティングを行った。

Table 1 T1 and T2 values of phantoms with various concentrations of gelatin (a) and sucrose (+10wt% gelatin) (b) with MnCl_2 .

(a)

T1/T2 value (ms)				
Gelatin gel concentration	MnCl_2 concentration (mM)			
	0	0.1	0.2	0.3
10wt%	1522/595	544/112	290/64	191/46
20wt%	1009/242	346/88	143/48	105/36
30wt%	690/135	178/58	90/35	71/30
40wt%	416/80	106/39	63/28	48/26
50wt%	258/55	—	—	—

(b)

T1/T2 value (ms)					
(Sucrose water) Sucrose concentration	+10wt% Gelatin (Sucrose gel)				
	MnCl_2 concentration (mM)				
	0	0.1	0.2	0.3	
10wt%	1594/241	1158/197	320/74	172/47	129/35
20wt%	1317/125	912/112	227/56	122/39	92/31
30wt%	1071/81	693/76	152/43	88/32	70/27
40wt%	646/60	527/50	105/32		
50wt%	528/31	320/30			

2. 結 果

2-1 試料の作成

ゼラチンゲルの作成にあたっては、30wt%を超える高濃度ゼラチンの溶解には数時間の湯煎による加熱が必要であり、50wt%のものは完全に気泡が消えるまで約2日間以上の時間を要した。また今回60wt%のものも作成してみたが、数日間加熱しても気泡が消えず十分に溶解できなかった。

スクロース溶液、スクロースゲルに関しては、湯煎を行うことにより、比較的容易に溶解することが可能であった。

2-2 ゼラチン濃度、スクロース濃度、塩化マンガン濃度と緩和時間の関係

Table 1aに作成したゼラチンゲル、Table 1bにスクロース溶液およびスクロースゲルの緩和時間を示す。ゼラチン濃度、スクロース濃度が高くなるに従いT1、T2値とも短くなり、50wt%ゼラチンゲルではT1=258、T2=55ms、50wt%スクロース溶液ではT1=528、T2=31msとなった。さらに50wt%スクロースゲルはT1=320、T2=30msとなり、ゼラチンはスクロースに比べT1短縮効果が大きく、T2短縮効果が小さいことが分かった。

またそれぞれ、最もT2値の短い50wt%ゼラチンゲ

ルおよび50wt%スクロースゲルに、他の濃度の試料のT2値を近づけるため、緩和剤として塩化マンガン濃度を0.1~0.3mMの範囲で加えたところ、ほぼ同程度のT2値を持つ試料が得られた。また、どの試料に関してもT2値は、塩化マンガン濃度が高くなると約30ms当たりでほぼプラトーに達した。

2-3 DWIの信号強度変化とADCの算出

Fig. 1aにゼラチンゲルの測定を行った際のファントムの配置を示すT2強調画像を、またFig. 1bに実際のDWI画像を示す。DWI撮像時に、磁化率アーチファクトを減少させるため、ファントムの周りには、DWIにて信号を出さないよう高濃度の塩化マンガンを溶解した水溶液を充填してある。スクロースについても同様な配置にて行った。

まずそれぞれ、塩化マンガンを含まない試料について、b値の違いによる信号の変化を調べた。縦軸を対数にとると、b値の増加に伴い、信号は直線的に減衰した。ゼラチンおよび、スクロース濃度が高くなるほど、その信号減衰の傾きは緩やかになっていた。

これらの塩化マンガンを添加していない各ファントムの信号減衰から(1)式を使用して算出した各ゼラチン、およびスクロース濃度でのADCをFig. 2に示す。ゼラチン、スクロース濃度の上昇に伴いADCが低下しているのが分かる。50wt%ゼラチンゲル、および

Fig. 1 (a) The geometric placement of gelatin phantoms on T2WI.
A high concentration of MnCl₂ solution is filled around the phantoms to suppresses the susceptibility artifact.
(b) DWIs of a gelatin phantom experiment.

50wt % スクロース溶液で $ADC=0.5 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$,
50wt%スクロースゲルでは $ADC=0.2 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ まで
低下させることができた。

次に、塩化マンガンを添加した各ファントムについて、b値の違いによる信号変化をFig. 3に示す。同じゼラチンまたはスクロース濃度では、対数表示した信号減衰の傾きは塩化マンガン濃度によらず一定であり、その傾きでもあるADCも一定である。つまり、緩和剤は、ファントムの初期信号値、つまりT2値を低下させるのみであり、拡散には影響しないことが分かる。

また、このファントムには、防腐剤として0.01wt%アジ化ナトリウムを添加することにより、ADCの値は少なくとも作成後2カ月間は有意の変動を示すことはなかった。

2-4 拡散計測時間とADCの関係

今回の実験に用いた撮像条件で、b値を最大1000s/mm²にて固定し、TEを74msから200msまで変

化させた場合、拡散計測時間 $\left(Dt = \Delta - \frac{1}{3}\delta\right)$ は27msから69msまで変化した。Fig. 4に今回作成したゼラチンゲルおよびスクロース溶液での、TEとADCの関係を示す。それぞれ50wt% -TE150, 200のものは、緩

Fig. 2 ADC versus concentration of gelatin gel, sucrose solution and sucrose +10wt% gelatin gel.
Each plot can be fitted to a straight line by the least-squares method

和時間が短く、ほとんど信号を得ることができなかったため、算出したADCは不正確なものとなっているが、その他のファントムでは、ADCの値はTEによらず一定であり、拡散計測時間によってADCは変化しないことが分かる。

Fig. 3 Relation between signal intensity and b-value at the DWI of the gelatin gels and sucrose-gelatin gels with various $MnCl_2$ concentrations. Each graph's inclination is constant within various concentrations of soothing agent. The soothing agent does not affect ADC and changes only relaxation time.

Fig. 4 ADCs of gelatin and sucrose phantoms as a function of TE.

2-5 ファントムの温度とADCの関係

今回作成したファントムの温度とADCの関係をFig. 5に示す。温度が低い場合はADCが低く、温度の上昇とともにADCは大きくなっている。グラフは最小二乗法にて直線フィッティングしてあるが、どれも相関係数0.99以上であり、温度とADCは比例関係にあると思われる。また、温度によるADCの変化は、ゼラチンまたはスクロース濃度が高くなるに従って傾きが小さくなる結果となった。

3. 考 察

3-1 試料の作成

今回のファントムの素材として、ゼラチンとスクロースを採用した。ゼラチンはコラーゲンを親物質とする動物性タンパク質である。約10万の分子量を持つ3本のポリペプチド鎖(α鎖)で構成されており、さまざまな用途のゲル化剤として用いられ、一般に安価で手に入る素材である。スクロース(Sucrose)は一般にショ糖とも呼ばれ、化学式： $C_{12}H_{22}O_{11}$ の二糖(グルコース+フルクトース)であり、こちらも食用として安価で手に入る素材である。

今回、高濃度のゼラチンやスクロースを用いることにより、水分子の拡散を制限したファントムを作成することができた。ゼラチン以外のゲル化剤(アガロース、カラギーナン)も試してみたが、どれも水分子の拡散を大きく低下させるほど高濃度に溶解することができなかった。実際にファントムを作成するにあたり、どちらを用いるのかが問題になる。高濃度(30wt%～)のゼラチンは長時間の湯煎等の加熱が必要のため作成に手間がかかるが、スクロースの場合、比較的容易に溶解でき、気泡も入りにくいことか

ら大きく拡散を低下させるには、スクロースの方が向いているものと考えられる。しかし、スクロースはゼラチンに比べT2短縮効果が大きく、比較的拡散の大きなファントムほどその差は大きいという特徴がある。T2の長いものは緩和剤により短縮できるが、もともと短いものは長くすることが不可能なため、このような場合は、ゼラチンの方が適しているのではないかと考える。

今回作成した50wt%スクロースゲルの拡散係数は約 $0.2 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ (20°C)となり、さらにスクロース濃度の高い溶液も作成可能である。臨床的には、拡散の低下した腫瘍などの拡散係数はこれより高い値($0.5 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$)であることが報告されていることから⁹⁻¹¹⁾、腫瘍等の病変を模擬したADCを持つファントムに十分適応可能と考える。

3-2 ゼラチン、スクロース濃度、塩化マンガン濃度と緩和時間の関係

ゼラチンやスクロース濃度を高くすることにより目的のADCを持つファントムの作成ができたが、同時に緩和時間も短縮する。DWI用のファントムにおいては特に、T2値も信号強度に影響することから、同じ拡散係数を持ちT2値の異なる試料や、同じT2値を持ち拡散係数の異なる試料を作成する必要がある。今回の実験では、T2値を最も短い高濃度のものに合わせるためには、緩和剤として塩化マンガンをも～0.3mMの濃度範囲で添加すればよいことが分かった(Table 1)。またこの値から、各濃度のファントムにおいて、添加した塩化マンガンのT2緩和度を求める近似式は以下ようになった。

Fig. 5 Relation between ADC and temperature of the phantoms (a) with various gelatin concentrations, (b) with various sucrose concentrations, and (c) with various sucrose concentrations with 10 wt% gelatin. Each experiment was repeated three times.

ゼラチンゲル

10wt%	$y=66.9x+2.0$	20wt%	$y=80.4x+4.0$
30wt%	$y=89.1x+8.3$	40wt%	$y=109x+13.5$

スクロースゲル

10wt%	$y=78.2x+5.4$	20wt%	$y=77.8x+9.5$
30wt%	$y=79.6x+14.2$	40wt%	$y=112.5x+20$

$y: 1/T_2(s^{-1}) \quad x: \text{塩化マンガン濃度(mM)}$

この式を用いれば、各濃度でのT2値を合わせることが出来る。今回の実験のように、高濃度のゼラチンゲルまたはスクロースファントムにおいては、プロトン密度もその信号強度に関係してくるため、その信号

値を完全に合わせるにはプロトン密度の違いも考慮する必要があると思われる。

また、緩和剤である塩化マンガンを添加すると、T2値と同時にT1値も短縮する。上述のT2緩和度と同様に算出したT1緩和度を求める近似式を以下に示す。

ゼラチンゲル

10wt%	$y=15.4x+0.5$	20wt%	$y=29.7x+0.6$
30wt%	$y=43.4x+1.6$	40wt%	$y=61.7x+2.9$

スクロースゲル

10wt%	$y=23.4x+0.6$	20wt%	$y=32.3x+1.4$
-------	---------------	-------	---------------

$$30\text{wt}\% \quad y=43.3x+1.9 \quad 40\text{wt}\% \quad y=76.3x+1.9$$

$$y: 1/T_1(\text{s}^{-1}) \quad x: \text{塩化マンガン濃度}(\text{mM})$$

通常T2WIが基本シーケンスとなるDWIでは、TRをT1値の5倍以上にするとT1の影響は無視できるが⁷⁾、IR型のDWIでは、T1の影響は無視できないため、このファントムをIR型DWIシーケンス⁴⁾の検討に用いる際は注意が必要である。

実際の悪性腫瘍では、T2値の短縮が起こることはあるが、同時にT1値の短縮が起こることは少なく、逆にT1値の延長が起こることの方が多い¹²⁾。よって、完全に病変を模擬したファントムを作成することはできないが、ある程度のシミュレートは十分可能であると考える。

3-3 DWIの信号強度変化とADCの算出

通常、拡散の均一な物質におけるDWIのb値と信号強度の関係は、一般に(1)式に従う⁷⁾ことが知られている。実際には今回のファントムにおいてb値を大きくしていくと、ノイズレベルに達したところで減衰は飽和するのが確認されているが、それまでの信号減衰は指数関数的な減衰を示しており、この理論式によくあっていた(Fig. 3)。また、この信号減衰は片対数にて表示した場合、b値の変化に対して直線的であるため、今回作成したファントムはMonoexponential ADC¹³⁾を持つファントムであることが分かる。このファントムを用いて行う実験は、Biexponential ADC¹³⁾を持つファントムを用いたものに比べて、より単純に結果を解析できるため、純粋に拡散の影響を模擬するのに適していると考えられる。ただ、実際の人体におけるDWI信号減衰はBiexponentialであり、今回のファントムを用いて行う研究の結果を、そのまま臨床に当てはめるのには注意が必要である。

Fig. 2は各溶液の濃度とADCの関係を示したものであるが、どれも濃度に反比例して拡散係数が直線的に低下しているのが分かる。しかし、スクロースゲルの場合、やや直線フィッティングから外れ緩やかなカーブを描いた。これは、このファントムがスクロースとゼラチンという二つの拡散を低下させる物質によって構成されているためなのか、もしくは、高濃度になり拡散の低下が飽和しているためなのか、今回の結果では明らかではない。

塩化マンガン量とADCの関係については、各濃度のファントムのDWI信号減衰曲線(Fig. 3)は、どれも添加塩化マンガンの量が変化しても、グラフの傾きは変化せず、上下にシフトしているだけである。つまり、塩化マンガンの量によってADCの値は変化しないといえる。

3-4 拡散計測時間とADCの関係

TEを変化させることによって、間接的に拡散計測時間を変化させ、ADCを計測した結果、測定されるADCは変化しなかった(Fig. 4)。今回作成した10wt%ゼラチンゲル、および10wt%スクロース溶液のADCを約 $1.8 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ とし、TE 200ms時の拡散計測時間を69msとした場合、(2)式から求められる根平均二乗変異距離は約 $15 \mu\text{m}$ であり、このことは、つまり、少なくとも $15 \mu\text{m}$ の範囲では、物理的に拡散を制限する構造物はなく、通常臨床利用される条件では、明らかな拡散制限を受けていないことになり、今回のファントムにおいて拡散が低下したのは、自己拡散自体が低下していることが原因と考えられる。しかし実際、生体内での拡散低下の原因は、細胞内液の粘性が高いことに起因する自由拡散の低下のほか、細胞膜や神経細胞におけるミエリン鞘などによる制限拡散の影響も指摘されている。よって、このファントムを用いて研究を行う場合、その結果が適応できる限界を知っておく必要があると考える。

3-5 ファントムの温度とADCの関係

物質の拡散係数は、下記の(4)式(ストークス-アインシュタインの式)に示すように、その物質の粘度や温度によって変化することが知られている⁷⁾。

$$D = kT / 6 \pi \eta r \quad \dots\dots\dots (4)$$

D: 拡散係数(m^2/s)

k: ボルツマン定数($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)

T: 絶対温度(K)

η : 粘度(kg/s/m)

r: 拡散粒子の半径(m)

今回のファントムの拡散係数が(4)式に従うと仮定すると、その変化項は T/η のみで、拡散係数は温度に比例し、粘性に反比例することが予想される。これを今回の結果と比較すると、今回のファントムのADCは、同一温度においては濃度の上昇、つまり粘性の上昇とともに低下し、また、温度の上昇とともに増加することから、よく一致している(Fig. 5)。しかし、粘性に関しては、ゼラチン溶液はゲル、スクロース溶液は液体と、全く違うにも関わらず、拡散係数は、ほぼ同じ低下を示した。文献¹⁴⁾によると、ゼラチンの硬さはコラーゲン繊維の増加によるものであるが、その繊維が水分子の拡散を制限するには、かなりの繊維量が必要であり、今回のようにゼラチンにて大きく拡散を低下させるのは容易ではない。逆に、スクロースはゼラチンに比べ分子量が小さく、水分子を構造化しやすいために、容易に拡散係数を低下させることができたと思われ、拡散粒子が水分子であるため、レオロジー的な粘性という概念は当てはまらない。

このように、ゼラチンおよびスクロースファントムを用いたDWIの撮像の際には、温度管理が重要であるが、ファントムの温度を、一定に保った室温に十分なじませておけば、再現性よくそのADCを求めることができた。

4. 結 語

高濃度のゼラチンやスクロースを用いることにより、正常組織から腫瘍組織や神経組織と同程度に水分子の拡散を低下させたファントムを作成することができた。また、緩和剤を添加することによりADCの値は不変で緩和時間のみを変化させることが可能なことが分かった。これにより、さまざまな状況でのDWI

のコントラストとADCの関係が模擬できるようになった。ただ、今回検討したファントムにおけるADCの低下は、自由拡散の低下に起因するものであり、DWIではMonoexponentialな信号減衰を示したが、生体における拡散の低下は、ほかのさまざまな要因によっても引き起こされ、Biexponentialな信号減衰を示すことが知られている。したがって、このファントムを用いて研究を行う際は、ファントムと生体での拡散の機序の違いを理解しておく必要がある。また今後、性質の異なる緩和剤を添加することにより、T1、T2値の両者を同時にコントロールしたファントムの作成も望まれる。

参考文献

- 1) 阿部 修, 清水靖志, 青木茂樹, 他. よくわかるdiffusionの原理. 日磁医誌 2005; 25(4): 198-208.
- 2) 渡邊祐司, 永山雅子, 奥村 明, 他. Low b-value diffusion-weighted MR imaging. 日磁医誌 2005; 25(4): 218-227.
- 3) 那須克宏, 黒木嘉典, 風間俊基, 他. 肝臓, 直腸, 乳腺のdiffusion-weighted MR imaging. DWIを癌の診断に導入する目的とは? 日磁医誌 2005; 25(4): 229-246.
- 4) 高原太郎, 今井 裕. 全身の拡散強調画像(DWIBS)について. 日磁医誌 2005; 25(4): 247-254.
- 5) Laubach HJ, Jacob PM, Loevblad KO, et al. A phantom for diffusion-weighted imaging of acute stroke. J Magn Reson Imaging 1998; 8(6): 1349-1354.
- 6) Hori M, Kim T, Murakami T, et al. Isotropic diffusion-weighted MR imaging with tetrahedral gradients in the upper abdomen. Magn Reson Med Sci 2006; 5(4): 201-206.
- 7) 荒木 力. 拡散MRI—ブラウン運動, 拡散テンソルからq空間へ. 東京: 秀潤社, 2006.
- 8) Kärger J, Pfeifer H, Heinik W. Principles and application of self-diffusion measurements by nuclear magnetic resonance. Advances in Magnetic Resonance 1988; 12: 1-89.
- 9) Kuroki Y, Nasu K, Kuroki S, et al. Diffusion-weighted imaging of breast cancer with the sensitivity encoding technique: analysis of the apparent diffusion coefficient value. Magn Reson Med Sci 2004; 3(2): 79-85.
- 10) Woodhams R, Matsunaga K, Kan S, et al. ADC mapping of benign and malignant breast tumors. Magn Reson Med Sci 2005; 4(1): 35-42.
- 11) Hosonuma T, Tozaki M, Ichiba N, et al. Clinical usefulness of diffusion-weighted imaging using low and high b-values to detect rectal cancer. Magn Reson Med Sci 2006; 5(4): 173-177.
- 12) Bottomley PA, Hardy CJ, Argersinger RE, et al. A review of 1H nuclear magnetic resonance relaxation in pathology: are T1 and T2 diagnostic? Med Phys 1987; 14(1): 1-37.
- 13) 新本 弘, 押尾晃一. High b-value拡散強調像. 日磁医誌 2008; 28(2): 114-121.
- 14) Brosio E, D'Ubaldo A, Verzegnassi B. Pulsed field gradient spin-echo NMR measurement of water diffusion coefficient in thickening and gelling agents: guar galactomannan solutions and pectin gels. Cell Mol Biol 1994; 40(4): 569-573.

図表の説明

- Fig. 1 (a)ゼラチンゲルの測定を行った際のファントムの配置(T2強調画像)
磁化率アーチファクトを抑えるため、高濃度の塩化マンガン水溶液を周りに充填してある。
(b)ゼラチンゲル測定時のDWI画像
- Fig. 2 ゼラチンゲル, スクロース水溶液, スクロースゲルの各濃度におけるADCの変化
各グラフは最小二乗法により直線フィッティングしてある。
- Fig. 3 各ゼラチンゲル, およびスクロースゲル濃度における, 塩化マンガン添加量とDWI信号強度の関係
各グラフは最小二乗法によりカーブフィッティングしてある。
- Fig. 4 ゼラチン, スクロースファントムについて, TEの違いにおけるADCの変化
- Fig. 5 ADCの温度特性
(a)ゼラチンゲル, (b)スクロース溶液, (c)スクロースゲル
各実験は3回繰り返して行った。

- Table 1 作成したファントムのT1値, T2値
a)ゼラチン
b)スクロース(+10wt%ゼラチン)