

軀幹部拡散強調画像における echo 時間 (TE) の違いに伴う ADC 値の変動について [大会長賞記録]

米山正己¹, 田中 宏², 木村雅子³, 浅井竜一¹,
井上裕二¹, 石井千佳子¹

¹お茶の水駿河台クリニック ²新柴又駅前クリニック ³東京慈恵会医科大学分子生理学

はじめに

当院では、軀幹部において拡散強調画像 (DWI) による質的診断を目的として、ルーチン撮像である最短 echo 時間 (TE, 65~82 ms) における multi b-value の DWI に加え、TE を 200 ms に設定した同様の multi b-value DWI を、必要に応じて追加撮像している¹⁾。

生体内では、蛋白質などの高分子との相互作用により、水プロトンの状態は異なり、各組織における横緩和時間 (T_2) は一つの指数関数ではなく、多重成分 (multi-exponential) からなり、これは各組織における水分子の状態の違いを反映しているものと考えられる^{2),3)}。我々の分析では悪性腫瘍において、正常組織に比べ T_2 値が長めの約 150 ms の結合水の比率が増加しており、この成分を強調するため TE を 200 ms とした DWI を追加撮像している。

DWI から得られる apparent diffusion coefficient (ADC) 値は『生体内における見かけの拡散係数』である。ADC 値は理論式からも、b-value に依存性があることは知られていたが、TE による影響は受けない、という認識が一般的であった。今回、最短 TE (65~82 ms) と、200 ms の TE 間で各部位・組織において ADC 値に違いがあったため報告する。

対象と方法

当院で 2006 年 3 月~2007 年 6 月に行った腹部骨盤領域検査において、TE = 200 ms の DWI が追加撮像された 116 例 (381 か所に ROI を設定) の ADC 値を測定した。内訳は女性骨盤 (子宮・卵巣) = 86 例 (正常子宮筋層 (59), 正常子宮内膜 (43), 子宮筋腫 (100), 子宮頸癌 (4), 子宮体癌 (6), デルモイド嚢胞 (15), 卵巣嚢腫 (16), 内膜症性嚢胞 (16), 卵巣癌 (18), 骨盤部膿瘍 (4)), 前立腺・膀胱 = 18 例 (正常前立腺 (26), 前立腺癌 (16), 膀胱癌 (15)), 上腹部 = 12 例 (肝臓 (17), 肝転移性腫瘍 (4), 腎臓 (15), 腎細胞癌 (4)) である (カッコ内の数字は設定した ROI の数を示す)。使用装置は Philips 社製 Achieva 1.5T, 撮像条件は TE 以外のパラメータは同一とした。また、motion probing gradient (MPG) は 3 軸同時印加法 (gradient overplus) を使用した。各部位の撮像条件は以下のとおりである: 女性骨盤は TR/TE1/TE2/b-value = 5000/71/200 ms/0,500, 1000 s/mm², 前立腺・膀胱は TR/TE1/TE2/b-value = 5000/82/200 ms/0, 1000, 2000 s/mm², 上腹部は TR/TE1/TE2/b-value = 1500 (呼吸同期併用) /65/200 ms/0, 400, 800 s/mm²。なお、本研究は当施設の倫理委員会の承認を得ている。

また、臨床画像 (女性骨盤) と同様の撮像条

キーワード diffusion weighted imaging, apparent diffusion coefficient, echo time, T_2 relaxation

件 (TR/TE1/TE2/b-value = 5000/71/200 ms/0, 500, 1000 s/mm²) で、蒸留水と中性洗剤を段階希釈した自作ファントムを用いてそれぞれのTEにおけるADC値を比較した。

結 果

Table に各TEにおけるADC値の測定結果および有意差を示す。正常子宮筋層、正常子宮内膜ともに、TEの延長によりADCは上昇傾向であった。子宮筋腫はTE=71 ms, b=1000で正常子宮筋層よりも高信号を呈するものと、等～低信号を呈するものに分類した。DWI高信号筋腫ではADCは不変～上昇傾向、DWI低信号筋腫ではADCは低下傾向であった。デルモイド嚢胞、内膜症性嚢胞ではADC値が低

下する例が多く、卵巣嚢腫や膿瘍ではほぼ不変であった。女性骨盤悪性腫瘍群では、他の組織、病変に比べTEによるADC値の変動の幅は小さかった。正常前立腺ではADCが上昇傾向であるのに対して、悪性腫瘍群では、軽度の低下や上昇はあるものの、変動の幅は小さかった。正常肝臓ではADCが著しく減少するのに対して、転移性肝腫瘍では、軽度の上昇はあるものの、変動の幅は小さかった。正常腎臓ではADCが上昇傾向であるのに対して、腎細胞癌では、軽度の上昇はあるものの、変動の幅は小さかった。

また、ファントムの組成および測定結果をFig. 1に示す。ファントム実験では、両者の間にほとんど違いはなかった。

Table. The Result of ADC Values Measurement in Each Echo Time (Shortest TE and TE = 200 ms)

	ADC short TE ($\times 10^{-3}$ mm ² /s)	ADC TE200 ($\times 10^{-3}$ mm ² /s)	p-value (Wilcoxon t-test)
myometrium (n=59)	1.589±0.23	1.807±0.35	p<0.0001
endometrium (n=43)	1.407±0.19	1.603±0.31	p<0.0001
uterine myoma (n=46) (low~iso signal intensity to myometrium in DWI)	1.193±0.22	0.775±0.41	p<0.0001
uterine myoma (n=54) (high signal intensity in b=1000 DWI)	1.246±0.28	1.379±0.44	p<0.005
uterine cervix cancer (n=4)	0.810±0.14	0.819±0.16	p=0.875
uterine corpus cancer (n=6)	0.865±0.12	0.968±0.21	p=0.0625
ovarian cancer (n=18)	0.929±0.14	1.035±0.22	p<0.005
endometrial cyst (n=19)	1.033±0.56	0.850±0.63	p<0.005
dermoid cyst (n=15)	0.889±0.35	0.571±0.40	p<0.001
ovarian cyst (n=16)	2.792±0.19	2.802±0.21	p=0.7367
pelvic abscess (n=4)	0.623±0.09	0.593±0.09	p=0.0975
prostate (n=26)	1.240±0.17	1.267±0.25	p=0.1499
prostatic cancer (n=16)	0.630±0.11	0.505±0.11	p<0.001
bladder cancer (n=15)	0.946±0.18	0.934±0.21	p=0.847
liver (n=17)	1.328±0.23	0.604±0.29	p<0.0001
metastatic liver tumor (n=4)	1.464±0.37	1.582±0.39	p=0.125
renal (n=15)	1.982±0.09	2.189±0.24	p<0.005
renal cell carcinoma (n=4)	1.385±0.19	1.622±0.34	p=0.125

The value of significant difference p value is indicated.

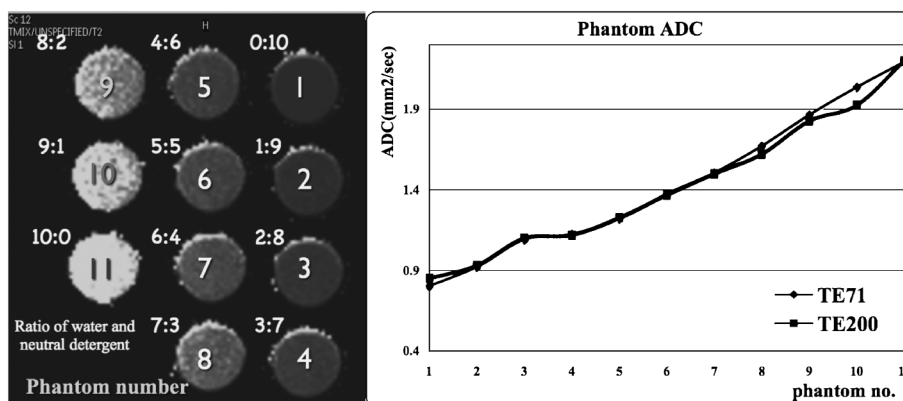


Fig. 1. The result of ADC values measurement in phantom study is shown.

考 察

各 TE によって ADC が異なった原因として、(1)信号雑音比 (SNR) の低下による影響、(2)磁化率による影響、(3)MPG 印加時間 (δ) による影響、(4)動きの影響、(5)血流 (灌流) による影響、(6)echo planar imaging (EPI)-echo train の影響、(7)組織における multi-exponential な T_2 緩和の影響 (異なった状態の水分子の割合および存在部位) などが考えられた。

TE 延長による ADC 値の変動について、第一に考えられるのが SNR の低下によるものであるが、ファントム実験の結果からは、TE 延長=SNR 低下による、ADC 値への影響は少ないことが示唆された。また、臨床画像では ADC が上昇する組織もあり、単純に SNR の低下だけでは説明のつかない例も存在した。ただし、 T_1 値を 1000 ms、 T_2 値を 50/100/200 ms と想定した場合、今回用いた DWI シーケンスで TE = 71 ms から 200 ms への変更をシミュレーションすると、SNR はそれぞれ 7.6/27.4/52.3% に低下する。このことから、例えば筋組織など、 T_2 値が短い組織では、SNR 低下の影響を強く受けている可能性があると考えられる。特に、常磁性体の存在により極端に T_2 値が短縮している病変 (例えば出血、血腫など)

では、TE 延長により著しく ADC が低下することを経験している。

今回用いた DW-EPI シーケンスについて、当院の装置では、 $b = 1000 \text{ s/mm}^2$ における MPG 印加時間 (δ) は TE 71 ms では 26 ms、TE 200 ms では 91 ms である。MPG の印加時間の影響、すなわち同じ b-value であっても、(1)強い傾斜磁場で短時間の印加、(2)弱い傾斜磁場で長時間の印加とでは、動きや灌流による影響が異なってくるものと予想されるが、現状では明らかでない。当院の装置では、 δ は設定した b-value および TE において最長の印加時間となるように (傾斜磁場への負荷を最小限にするために)、装置によって自動設定されるため、任意に設定変更することは不可能であり今後の検討課題である。また、読み取りの際の EPI-echo train も TE = 200 ms では、位相エンコード数を変更していないため、echo-spacing が延長し、シングルショット高速スピンエコー法における heavy T_2 強調と同様の効果により、 T_2 -shine through をより強調し、特に T_2 値が比較的長い組織において、TE 延長による ADC の上昇に影響を及ぼしている可能性もあると考える。

臨床画像における信号と ADC 値の変化について考察してみると、 $b = 1000 \text{ s/mm}^2$ の DWI

で正常筋層と等信号～低信号の子宮筋腫では、ADC値が著しく低下した。筋腫や筋組織などの線維組織では、プロトン密度が低下しているためではなく、水の構造化の割合が高い。すなわち、自由水比率が減少しているために、TEを延長させると信号が著しく小さくなり、MPGの影響が測定不可能なほどになり、ADC値も低下するものと考えられる。また、 $b = 1000 \text{ s/mm}^2$ のDWIで正常筋層よりも高い信号の子宮筋腫では、ADC値が上昇傾向を示した。TE = 71 msのDWIでの高信号化の主な理由は、細胞密度の上昇に伴う細胞内の比較的 T_2 の短い結合水の増加であると思われる。 T_2 の短い結合水はTE = 200 msのDWIでの信号には寄与できず、TE = 200 ms, $b = 0$, 500 s/mm^2 のDWIにおける信号の主座は間質に多く存在する比較的 T_2 の長い結合水が優位となり、 $b = 1000 \text{ s/mm}^2$ では信号減衰するものと考えられる。このように、TEの延長により測定対象となる水分子そのものが変わるために、この場合では T_2 shine-throughが強調され、ADCが上昇するものと考えられる。また、悪性腫瘍群では、ADC値に変化がなかった。これは、細胞内で制限拡散の状態にある水分子が、比較的長い T_2 をもつ結合水主体であるためだと考えられる。このため、TE = 71 msでもTE200 msでもADCは変化しないものと考えられる。しかしながら、これらの変化は、最高b-valueを 2000 s/mm^2 に設定した前立腺では異なっていく

ことから、b-valueが高くなるほどTEによる影響は小さくなっていくものと考えられる。

結 語

各部位・組織においてADC値はTEによる違いがみられた。様々な要因が考えられるが、組織におけるmulti-exponentialな T_2 緩和、すなわち、組織内における高分子周囲環境の違いに由来する、結合水と自由水の比率を反映している可能性がある。測定時間(TE)を変えることにより、水分子の状態の違いを反映したADC値が得られ、DWI高信号病変の質的診断に寄与する可能性があると考えられる。

文 献

- 1) 田中 宏, 中野 真, 石井千佳子, 佐藤秀一, 米山正己, 浅井竜一, 新藤久美子, 井上裕二: エコー時間を200ミリ秒に設定した拡散強調画像の婦人科領域における有用性. 第66回日本医学放射線学会学術集会抄録集 2007: S346
- 2) Kimura M, Takemori S, Yamaguchi M, Umazume Y: Differential osmotic behavior of water components in living skeletal muscle resolved by $^1\text{H-NMR}$. Biophysical J 2005; 89: 1143-1149
- 3) 田中 宏, 清水 桜, 長瀬雅則: MR信号と水の状態— T_2 強調像で低信号を示す病変—. 画像診断 2000; 20: 1295-1302

Apparent Diffusion Coefficient Changes by Echo Time in Diffusion-weighted Imaging of the Body [Presidential Award Proceedings]

Masami YONEYAMA¹, Hiroshi TANAKA², Masako KIMURA³,
Ryuichi ASAI¹, Yuuji INOUE¹, Chikako ISHII¹

¹*Department of Radiology, Ochanomizu Surugadai Clinic
2-1-47-2F, Kanda-surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0062*

²*Shin-shibamata Eki-mae Clinic*

³*Department of Molecular Physiology, The Jikei University School of Medicine*

The apparent diffusion coefficient (ADC) and ADC values are used for quantitative analysis in diffusion-weighted imaging (DWI) using different b-values. The ADC values are thought to be independent of echo time (TE). We attempt to characterize lesions using different DWI echo times as well as different b-values. In this study, we report the differences in ADC values between 2 echo times (the shortest TE, 65~82 ms, and TE, 200 ms). One of the most important reasons of the result is thought to be the ratio of the multi-exponential T₂ relaxation in tissues, which is the ratio of free and bound water. With different TEs, differences of the ADC values are thought to analysis each segment of multi-exponential T₂ relaxation, and it is expected to characterize the high signal intensity lesions in DWI.