

Oscillating gradient spin echo (OGSE) 法の拡散強調像の 基礎的検討：基質の粘稠度の違いによる ADC 値の変化 [大会長賞記録]

前川 朋子^{1,2}, 堀 正明¹, 福永一星¹, 村田勝俊⁴,
越野 沙織^{1,2}, クリスティナアンディカ¹, 入江隆介^{1,2}, 萩原彰文^{1,2},
村田 渉¹, 瀧崎 望¹, 堀田萌子^{1,3}, 武中祐樹^{1,3},
青木茂樹¹

¹順天堂大学医学部附属順天堂医院放射線科・部

²東京大学大学院医学系研究科放射線医学講座

³首都大学東京人間健康科学研究科放射線科学域

⁴シーメンスヘルスケア株式会社

背 景

従来の pulsed gradient spin echo (PGSE) 法による拡散強調像と比較して, oscillating gradient spin echo (OGSE) 法による拡散強調像では周波数を変化させることにより拡散時間を短縮することが可能となり, 拡散係数の変化によって内部構造を推定する手法として期待されている^{1)~3)}. Tofts らは等方性拡散ファントムとしてランダムエラーの少ないアルカンを報告している⁴⁾. 鎖式飽和炭化水素であるアルカン C_nH_{2n+2} は直鎖のメチレン基から構成されており, 端にメチル基を有する. アルカンは安定した物質で扱いやすく, 安価に手に入りやすいことからファントムとして適している. アルカンは異方性がなく, 炭素数が増加するにつれ粘稠度が増すことが知られており, アルカンの拡散係数は拡散時間に依存しないと推定される. OGSE 法の拡散強調像において粘稠度の違いにより ADC 値がどのように変動するか明らかにするために, アルカンをファントムとして用いた基礎的検討を行った.

方 法

アルカンのうち $C_8H_{18} \sim C_{16}H_{34}$ の 9 種類を

ファントムとして使用した. 各アルカンを 100 ml のポリエチレンボトルに入れ, ボトルをコネクタ内に置き, ボトル間は磁化率アーチファクトを抑えるため, プラスチックボールで埋めた (Fig. 1). 拡散強調像を 3T の MRI (MAGNETOM Prisma, Siemens Healthcare GmbH, Erlangen, Germany) にて 64 チャンネルヘッドコイルを用い撮像した. b 値は 0, 700 s/mm^2 とした. OGSE 法で拡散時間を 4.3, 4.6, 5.1, 5.7, 6.5, 7.6, 9.3, 49.1 ms (周波数 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20, 0 Hz) と変化させて撮像した. また間を埋めるために, PGSE 法で拡散時間を 35.8, 40, 45 ms と変化させて撮像した. MRI の撮像条件は以下のとおりである. repetition time = 11800 ms, echo time = 143 ms, field of view = 200 × 200 mm, matrix size = 82 × 82, slice thickness = 5 mm, each acquisition time = approximately 16 to 17 min. 撮像は同じ条件で 2 回行った. MRI 装置内の温度はアルコール温度計で測定し, 室温のみの調整で 21°C と一定にした. apparent diffusion coefficient (ADC) map 上で円形 ROI (2.16 cm^2) を各アルカンファントム上に置き ADC 値を求め, 各アルカンにおいてどのように変動するか検討した. ADC 値の安定性を評価するために変動係数を計算した.

キーワード oscillating gradient spin echo, alkane, isotropic diffusion, phantom, ADC

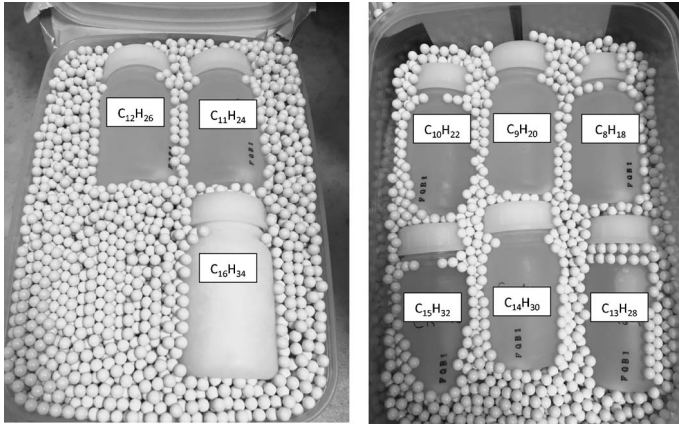


Fig. 1. Alkane phantoms. 9 n-alkane substrates were filled into 100 ml polythene bottles, which were then placed in a container filled with plastic balls.

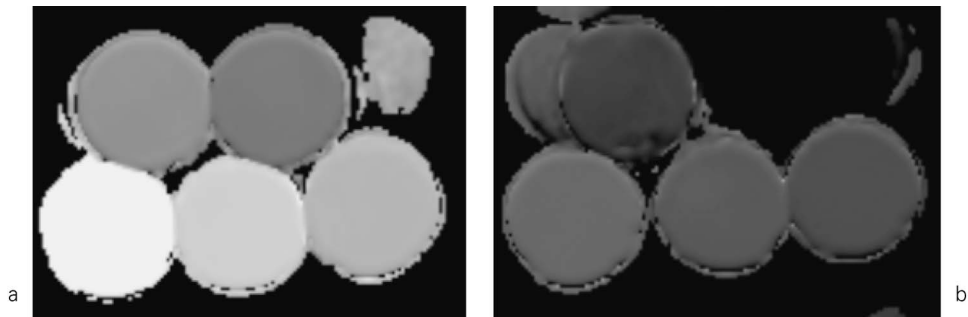


Fig. 2. ADC maps of alkane phantoms, acquired by oscillating gradient echo sequence with frequency of 40 Hz and diffusion time of 5.1 ms. Distribution of the phantoms are as follow : bottom left, C_8H_{18} ; bottom middle, C_9H_{20} ; bottom right, $C_{10}H_{22}$; top left, $C_{11}H_{24}$; top right $C_{12}H_{26}$ (a) ; bottom left, $C_{13}H_{28}$; bottom middle, $C_{14}H_{30}$; bottom right, $C_{15}H_{32}$; top left, $C_{16}H_{34}$ (b).

結 果

アルカンファントムの ADC map の例（拡散時間 5.1 ms, 周波数 40 Hz）を Fig. 2 に示した. 各アルカンの平均 ADC 値を Fig. 3, Table に示した. Tabel には Tofts ら⁴⁾が報告している ADC 値を併記した. いずれの撮像条件においても, アルカンの炭素数が増加するにつれ ADC 値は低下した. 各アルカンにおいて, 短い拡散時間を含め拡散時間を変化させても ADC 値はほぼ一定であった. またアルカンの平均 ADC 値は粘度と反比例の関係にあった (Fig. 4). 繰り返しの撮像による変動係数は 0.9~4.3%であった. 異なる拡散時間によって 11 回撮像した場合の変動係数は 2.2~3.9%で

あった.

考 察

粘稠度が高い液体において拡散時間を短縮しても ADC 値はほぼ一定であることが確認できた. また, 変動係数は 5%未満であり安定していた. アルカンの平均 ADC 値と粘度はストークス-アインシュタインの式のとおり, 反比例の関係を示した. 今回使用したアルカン類は今後の臨床 Protocol 精度評価として使用できるものと考えられる. また, 正常脳では拡散時間を短くすると ADC 値は上昇することが知られている (Tsuruta K, et al. Frequency Dependence of Diffusion Metrics by Oscillating Gradi-

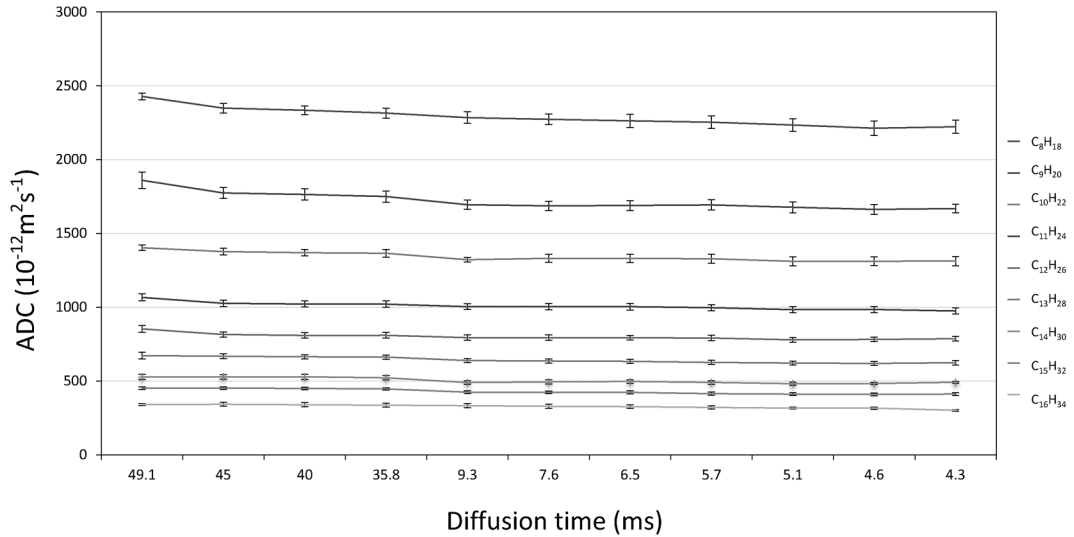


Fig. 3. The mean ADC values of 9-alkanes and diffusion times. For each n-alkane, the mean ADC values were almost constant with the change in diffusion times.

Table. ADC values of 9 n-alkanes on each effective diffusion time (eff.Δ)

eff.Δ (ms)	Apparent Diffusion Coefficient (10 ⁻¹² m ² s ⁻¹)								
	C ₈ H ₁₈	C ₉ H ₂₀	C ₁₀ H ₂₂	C ₁₁ H ₂₄	C ₁₂ H ₂₆	C ₁₃ H ₂₈	C ₁₄ H ₃₀	C ₁₅ H ₃₂	C ₁₆ H ₃₄
49.1	2428 ± 23	1860 ± 55	1403 ± 19	1066 ± 24	853 ± 23	672 ± 23	528 ± 18	452 ± 8	340 ± 6
45	2348 ± 32	1774 ± 38	1376 ± 22	1026 ± 21	815 ± 17	668 ± 16	528 ± 16	452 ± 8	342 ± 13
40	2334 ± 30	1764 ± 39	1369 ± 22	1021 ± 20	809 ± 19	664 ± 14	528 ± 17	449 ± 8	339 ± 14
35.8	2315 ± 33	1750 ± 38	1365 ± 25	1020 ± 21	809 ± 19	662 ± 15	522 ± 14	446 ± 8	336 ± 12
9.3	2284 ± 39	1694 ± 30	1321 ± 14	1003 ± 19	793 ± 18	639 ± 14	489 ± 12	424 ± 9	332 ± 14
7.6	2273 ± 36	1686 ± 31	1331 ± 27	1003 ± 21	793 ± 18	635 ± 14	494 ± 13	423 ± 9	329 ± 14
6.5	2262 ± 44	1689 ± 34	1331 ± 28	1003 ± 22	793 ± 16	633 ± 14	497 ± 12	423 ± 10	326 ± 11
5.7	2253 ± 41	1693 ± 35	1328 ± 31	996 ± 21	791 ± 18	626 ± 14	491 ± 12	414 ± 11	321 ± 10
5.1	2234 ± 42	1677 ± 37	1311 ± 30	983 ± 20	779 ± 16	621 ± 12	482 ± 11	411 ± 10	316 ± 6
4.6	2213 ± 49	1662 ± 33	1311 ± 29	984 ± 20	782 ± 15	619 ± 13	483 ± 8	410 ± 10	316 ± 7
4.3	2222 ± 44	1668 ± 29	1312 ± 31	974 ± 20	786 ± 15	624 ± 15	491 ± 6	412 ± 10	301 ± 5
Tofts ^a	2179	1652	1286	1027	800	649	502	414	349

Values are mean ± standard deviation.

^a Diffusion coefficients derived from Tofts et al. (4), measured at 21°C.

ent Spin Echo. P1-A2-048. JSMRM 2017).

臨床の場で拡散強調像高信号病変に短い拡散時間での計測を加えることで、基質の粘稠度と空間的制限拡散の寄与の割合を評価することができ、拡散強調像高信号病変の鑑別に役立つ可能性がある。

結 語

アルカンの平均 ADC 値は拡散時間を変化させてもほぼ一定であることが確認できた。アルカンの平均 ADC 値と粘度は理論とおり反比例の関係を示した。アルカンは OGSE 法の臨床 Protocol 精度評価として使用できるものと考えられる。

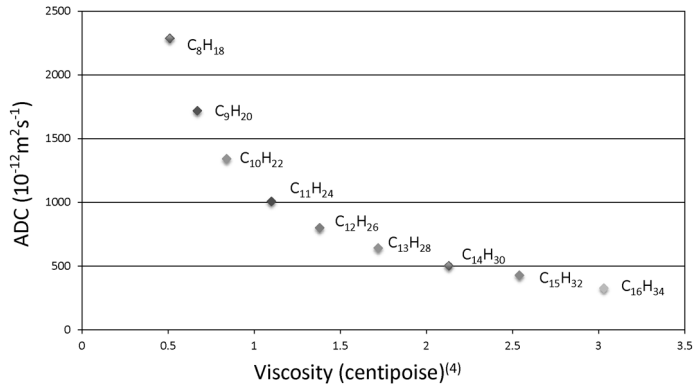


Fig. 4. The mean ADC values of 9 n-alkanes and viscosity. The ADC values were inversely proportional to the viscosity.

文 献

- 1) Wu D, Martin LJ, Northington FJ, Zhang J : Oscillating gradient diffusion MRI reveals unique microstructural information in normal and hypoxia-ischemia injured mouse brains. Magn Reson Med 2014 ; 72 : 1366-1374
- 2) Novikov DS, Jensen JH, Helpert JA, Fieremans E : Revealing mesoscopic structural universality with diffusion. Proc Natl Acad Sci U S A 2014 ;

111 : 5088-5093

- 3) Hori M, Irie R, Suzuki M, Aoki S : Teaching Neuroimages: Obscured Cerebral Infarction on MRI. Clin Neuroradiol 2017
- 4) Tofts PS, Lloyd D, Clark CA, Barker GJ, Parker GJ, McConville P, Baldock C, Pope JM : Test liquids for quantitative MRI measurements of self-diffusion coefficient *in vivo*. Magn Reson Med 2000 ; 43 : 368-374

**Diffusion-weighted MRI with Oscillating Gradient Spin Echo (OGSE) Sequence :
Changes of ADC due to Differences in the Viscosity of Substrates
[Presidential Award Proceedings]**

Tomoko MAEKAWA^{1,2}, Masaaki HORI¹, Issei FUKUNAGA¹,
Katsutoshi MURATA⁴, Saori KOSHINO^{1,2}, Christina ANDICA¹,
Ryusuke IRIE^{1,2}, Akifumi HAGIWARA^{1,2}, Syo MURATA¹,
Nozomi HAMASAKI¹, Moeko HORITA^{1,3}, Yuki TAKENAKA^{1,3},
Shigeki AOKI¹

¹*Department of Radiology, Juntendo University School of Medicine
2-1-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8421*

²*Department of Radiology, Graduate School of Medicine, The University of Tokyo*

³*Department of Radiological Sciences, Graduate School of Human Health Sciences, Tokyo Metropolitan University*

⁴*Siemens Healthcare K.K.*

Introduction: Compared to diffusion-weighted imaging (DWI) with a conventional pulsed gradient spin echo (PGSE) sequence, DWI with an oscillating gradient spin echo (OGSE) sequence can shorten the diffusion time by changing the frequency. The purpose of this study was to investigate the suitability of n-alkanes as isotropic phantoms for estimation of the diffusion coefficient of an OGSE sequence.

Methods: We investigated the changes in apparent diffusion coefficient (ADC) due to differences in the viscosity of 9 n-alkane phantoms with different numbers of carbon atoms (C₈H₁₈ to C₁₆H₃₄) using OGSE and PGSE sequences at 21°C. Effective diffusion times of 4.3, 4.6, 5.1, 5.7, 6.5, 7.6, 9.3, 35.8, 40, 45, and 49.1 ms were used. Sphere regions of interest were placed manually within the alkane phantoms on ADC maps.

Results: In each alkane phantom, the mean ADC value was approximately constant with the change in diffusion time. The viscosities and ADC values were inversely proportional, as theoretically expected.

Conclusion: The ADC values of alkanes do not depend on the diffusion times. The n-alkane phantoms can be used to assess the clinical accuracy of DWI with an OGSE sequence.