臨床技術

電子レンジを用いた拡散強調画像用脳実質等価ファントムの作製—加熱方法の違いについて—

橋本真衣子¹ 高橋雅彦¹ 林 則夫² 上原真澄² 杉山和代¹ 北爪翔太¹論文受付
2019年9月3日論文受理
2020年2月4日

Code No. 261

¹ 伊勢崎市民病院中央放射線科² 群馬県立県民健康科学大学大学院診療放射線学研究科

緒言

現在、人を対象とする医学系研究は、文部科学省、厚生労働省からの人を対象とする医学系研究に関する倫理指針により「研究対象者の福利は、科学的及び社会的な成果よりも優先されなければならない、また、人間の尊厳及び人権が守られなければならない」とされ、ボランティア実験の施行も厳しく制限されている¹⁾。そのため撮像条件の最適化などを図る際は、ファントムを用いて行うことが多い。ファントムを用いることで、治療を優先しなければならない急性期脳

梗塞などの疾患についても、時間をかけて撮像条件の検討が可能である。

これまで拡散強調画像(diffusion weighted image: DWI)用ファントムは目的に応じ多数作製されてきた。Toftsらはアルカンを用いた拡散の測定を²⁾、Lavdasらはニッケルとアガロース、スクロースにより正常または悪性の生体組織にみられるものと同様の緩和および拡散特性を有するゲルを³⁾、Matsuyaらはapparent diffusion coefficient(ADC)標準ファントムとしてポリエチレングリコールを使用したものを⁴⁾、田

Creation of Brain Parenchymal Equivalent Phantom for Diffusion Weighted Image Using Microwave Oven: A Different Heating Method

Maiko Hashimoto,^{1*} Masahiko Takahashi,¹ Norio Hayashi,² Masumi Uehara,² Kazuyo Sugiyama,¹ and Shouta Kitadume¹¹ Central Radiology Department, Isesaki Municipal Hospital² Graduate School of Radiological Technology, Gunma Prefectural College of Health Science

Received September 3, 2019; Revision accepted February 4, 2020

Code No. 261

Summary

The acute micro cerebral infarction phantom was created to evaluate the detectability of acute micro cerebral infarction and optimize scan conditions in magnetic resonance imaging (MRI) examinations. The creation of the brain parenchyma phantom requires a hot stirrer that can be heated and stirred simultaneously. However, few hospitals and facilities have hot stirrers. The aim of our study was to use a microwave oven instead of a hot stirrer for the creation of a brain parenchyma phantom. Five phantoms using a hot stirrer and five phantoms using a microwave oven were created. The phantom creation time, T₂ value, apparent diffusion coefficient (ADC) value, uniformity, and reproducibility of MR images were compared between the two creation methods. The phantom creation time, when using a microwave oven was 108±8 minutes, which was significantly shorter than that of 213±48 minutes when using a hot stirrer. T₂ values, ADC values, uniformity, and reproducibility were not significantly different. Therefore, it is easier to create an acute micro cerebral infarction phantom using a microwave oven compared to a hot stirrer.

Keywords: magnetic resonance imaging (MRI), diffusion-weighted image (DWI), infarction, phantom, microwave oven

*Corresponding author

村らはゼラチンとスクロース、塩化マンガンを用い ADC 値および T_2 値を個別にコントロールしたファントムを⁵⁾ 作製した。これらは ADC 値、もしくは ADC 値と T_2 値をコントロールするファントムであった。急性期脳梗塞ファントムは Laubach らが寒天からなる灰白質相当部分にスクロースからなる脳梗塞相当部分を封入したものを作製した⁶⁾。このファントムは T_2 値を人体同等としていたが、ADC 値は人体の 2 倍強の値となっていた。そのため正常な脳実質と同等の ADC 値、 T_2 値をもった脳実質に相当するファントム(脳実質部ファントム)内に急性期脳梗塞と同等の ADC 値、 T_2 値をもった脳梗塞に相当する(脳梗塞部ファントム)ファントムが封入され、 T_2 強調像で双方の間にコントラストが認められないファントムを作製する方法は報告されておらず、更に微小脳梗塞を評価するためのファントムも報告されていなかった。そこで、われわれは contrast to noise ratio(CNR)等により DWI の撮像条件を評価するための急性期微小脳梗塞ファントムを作製した⁷⁾。脳実質部ファントムはゼラチンとスクロースを用い、加熱とマグネットによる攪拌が同時にできるホットスターラーを使用して作製した。その内部に円柱状の空間を作製し、液体の脳梗塞部ファントムを封入した。脳実質部ファントムにゲルを用いることで形状の安定を図り、脳梗塞部ファントム部分は空気混入による磁化率アーチファクトを防ぐため、液体で作製した。この脳実質部ファントムの作製にはある程度の工夫が必要であり、3~5 時間程度を要している。先行研究⁷⁾の手法では、ゼラチンとスクロースを溶液中に投入するタイミングや方法、回転させる攪拌子の大きさや回転速度、回転位置、作製するファントムの量や濃度、ビーカの大きさなどが原因となって作製時間にばらつきがみられた。更にゼラチンがビーカの底で大量に塊となり、攪拌子が回転できずに溶解できないものもあった。このようにホットスターラーを用いてゼラチンを溶解するためには、作製者に技術が必要であり、濃度や作製する量により困難となる場合がある。更に、一般的な病院や施設ではホットスターラーを保有していない。そこで、本研究ではホットスターラーの有無にかかわらず作製可能な方法として、電子レンジを用いて脳実質部ファントムを作製した。一般的にゼラチンを溶解する場合湯煎を用いることがあるが、温度管理や加熱方法、作製スペース、火傷などのリスクを考え、予備実験程度行ったのみであった。過去、電子レンジを用いたゼラチンの溶解により Olsrud らや、Vassiliou らが MRI 用ファントムを作製している^{8,9)}。そのためゼラチンの溶解

に電子レンジを用いることは一般的と考えられるが、他の手法と比べた研究はない。よって、われわれは先行研究で作製した脳実質部ファントムと電子レンジを用いたものを比較し、評価することを目的とした。

1. 方 法

先行研究における急性期微小脳梗塞ファントムは、脳実質部ファントムとして、ゼラチン 17.0 wt%とスクロース 20.0 wt%による混合ゲル、脳梗塞部ファントムとしてコラーゲンペプチド 16.0 wt%とスクロース 27.5 wt%による混合溶液を用いて作製した。本研究では、脳実質部ファントムをホットスターラーで作製した先行研究による方法と、電子レンジで作製したもので比較し評価した。評価項目は、作製時間、 T_2 値、ADC 値、内部の均一度、再現性とした。また、両手法による急性期微小脳梗塞ファントムを作製し比較した。双方に使用する脳梗塞部ファントムはホットスターラーを用いず、薬さじによる攪拌で作製した。ホットスターラーを用いて作製した脳実質部ファントムと、電子レンジを用いて作製したものの作製手順をフローチャートとして Fig. 1 に示す。

1-1 先行研究による急性期微小脳梗塞ファントムの作製手順

以下の①から⑦により急性期微小脳梗塞ファントムを作製した。

- ①純水 315.0 g, ゼラチン 85.0 g, スクロース 100.0 g を 500 ml のビーカに入れた。
- ②ホットスターラーを 75℃, 500 回転毎分(rotations per minute: rpm)に設定し、蒸発を防ぐためラップにより密封し、加熱、攪拌によりゼラチンとスクロースを溶解した。
- ③溶解したゼラチンとスクロースの混合溶液の気泡が抜けるまで 30 分静置した。
- ④工作丸棒を袋状にした熱収縮フィルムで包み、熱湯内に入れることで双方を密着させ、ビーカ内に固定した。
- ⑤ゼラチンとスクロースの混合溶液を冷却しゲル化した。
- ⑥ 50 ml ビーカを用いて純水 10.6 ml に、コラーゲンペプチド 4.0 g (20.0 wt%), スクロース 5.4 g (27.5 wt%)をホットスターラーにより加熱することなく 500 rpm で攪拌し脳梗塞部ファントムを作製した。
- ⑦工作丸棒を引き抜き、できた空間に脳梗塞部ファントムを封入した。

Fig. 1 Flow chart showing the creation of the brain parenchymal equivalent phantom for diffusion weighted images using a hot stirrer and a microwave oven.

1-2 使用機器および材料

ファントム作製には以下の材料を使用した：ホットスターラー：AS ONE magnetic stirrer REXIM RSH-1D, 防水型食品用デジタル温度計：佐藤計量器 SK-250WP11-R, 電子天秤：株式会社エー・アンド・デイ 高精度・コンパクトスケール HT-120, 電子レンジ：SHARP RE-A15KS, ゼラチン：Wako Lot. LKF6504, コラーゲンペプチド：Wako Lot. WDG5968, スクロース：Wako Lot. WBJ3004, 純水製造装置：オルガノ PURE LITE PRO-025, PTFE 攪拌子 (SA 型) 35 mm.

また、作製したファントムは、MR 装置 (SEMENS MAGNETOM Aera 1.5T) および受信コイル (HEAD-Neck coil 20ch) を用いて MR 画像を収集した。

1-3 脳実質部ファントムの作製

1-3-1 ホットスターラーを用いた脳実質部ファントムの作製

ホットスターラーを用いた脳実質部ファントムの作製手順は、前述の 1-1 における作製手順の①、②、③とした。

1-3-2 電子レンジを用いた脳実質部ファントムの作製

電子レンジを用いて脳実質部ファントムを作製する場合、ホットスターラーを用いた脳実質部ファントムの作製手順の②を、以下のように変えたものである。

②電子レンジの出力を 500 ワットとし、ゼラチンと

スクロースの混合溶液を 90 秒間加熱後、薬さじを用いて 60–120 rpm 程度で 1 分間手動により攪拌した。その後 15 分間隔で 5 回攪拌を行った。なお、作製途中で混合溶液の温度が 40°C 以下になった場合、更に電子レンジで 60 秒間加熱を行った。

1-4 作製手法の違いによる脳実質部ファントムの精度評価

ホットスターラーを用いた方法と、電子レンジを用いた方法で作製した脳実質部ファントムの精度を評価するため、それぞれ 5 個作製し、作製時間、 T_2 値、ADC 値、均一度、再現性を評価した。

1-4-1 作製時間の比較

脳実質部ファントムを作製するための純水、ゼラチン、スクロースからなる混合溶液を加熱開始から、溶解後気泡が抜けるまでの時間を測定し、作製方法別に平均および標準偏差を求めた。

1-4-2 T_2 値、ADC 値の比較

ホットスターラーを用いた方法と、電子レンジを用いた方法で作製した脳実質部ファントム 5 個ずつの T_2 値、ADC 値を用いて平均および標準偏差を求めた。 T_2 値の測定は spin echo 法を使用し、マグネットセンターにコイルを設置し、コイルの中央部に 500 ml ビーカを配置した。TE 50, 75, 100, 125, 150, 175 ms, TR 5000 ms, field of view (FOV) 25.6 cm, マトリ

Fig. 2 Setting of the region of interest (ROI).
(a) The ROI was set by using the T_2 -values, (b) The ROI was set by using the apparent diffusion coefficient values.

クス数(周波数エンコード数×位相エンコード数)256×256, 受信バンド幅 130 Hz/Px, スライス厚 5 mm, 加算回数 1, イメージングオプションなしで撮像を行った。撮像時の室内温度は 21.9–23.5℃であった。撮像断面はファントムに対し垂直方向で、マグネットの x-y 平面とした。得られた echo time(TE)の異なる画像を MR 装置のダイナミック解析機能を利用し、 T_2 map を作製した。 T_2 map から NEMA 法に則し¹⁰⁾、関心領域(region of interest: ROI)は全体の 80%程度とし、Fig. 2 のように設定した。

ADC 値の測定は、readout segmentation of long variable echo-trains(RESOLVE)を用いて撮像を行った。また motion probing gradient の印加方式は、multi shot echo planar imaging 3-scan trace(3 軸同時印加)を用いて、b 値 0, 1000 s/mm² の拡散強調画像を取得した。RESOLVE における TE は、頭部において一般的な TE 60, 92 ms とした。その他の撮像条件は以下のとおりである：TR 6000 ms, FOV 22.0 cm, マトリクス数 150×150, 受信バンド幅 758 Hz/pix, スライス厚 5 mm, 加算回数 1 回。得られた拡散強調画像を MR 装置のダイナミック解析機能を利用し、ADC map を作製した。ADC map より T_2 値の測定同様に ROI を設定し測定した。

1-4-3 T_2 値と ADC 値による脳実質部ファントムの均一度評価

ホットスターラーを用いた方法と、電子レンジを用いた方法で作製した脳実質部ファントム 5 個ずつの均一度を評価するため、設定した ROI 内の最大信号値 T_2 (ADC)max と最小信号値 T_2 (ADC)min からスパン、中央値を求め不均一度を算出し、均一度を求めた³⁾。

1-4-4 作製方法別脳実質部ファントムの再現性評価

ホットスターラーを用いた方法と、電子レンジを用いた方法で作製した脳実質部ファントムの再現性を評

価するため、1-4-2 で算出した T_2 値と ADC 値の平均と標準偏差を利用し、変動係数を算出し再現性を比較した。

1-5 急性期微小脳梗塞ファントムの作製

脳実質部ファントム作製手順以外は先行研究に沿って急性期微小脳梗塞ファントムを作製した。封入した脳梗塞部は直径 5 mm の円柱状の空間 1 本のみとし、信号強度を濃度により微調整した脳梗塞部ファントムを封入した。

1-6 ホットスターラーを用いて作製した急性期微小脳梗塞ファントムと電子レンジによるファントムの比較

両手法により作製したファントムを、ADC 値測定時と同じ撮像条件で 2 方向撮像し、プロファイルカーブを画像解析ソフト imageJ(NIH)¹¹⁾ により作成した。

1-7 統計解析

作製時間、 T_2 値および ADC 値、均一度については、ホットスターラーを用いた方法と電子レンジを用いた方法、それぞれから得られた五つの値を用いて student's t-test(t 検定)により有意差検定を行った。有意水準は 0.05 とした。統計解析には、フリー統計ソフト EZR(Easy R)を用いた¹²⁾。

2. 結果

Table に比較項目の結果を示す。ホットスターラーを用いて作製した脳実質部ファントムと電子レンジを用いて作製したものとは、作製時間に有意差を認めたが、その他の比較項目では有意差を認めなかった。

Table Comparison table of the brain parenchymal phantoms created using a hot stirrer and those created using a microwave oven

	Hot stirrer	Microwave oven
Creation time [min]	213±48	108±8
T ₂ -value [ms]	83.82±0.55	83.08±0.59
Apparent diffusion coefficient [$\times 10^{-3}$ s/mm ²]	0.825±0.007	0.818±0.006
Uniformity		
T ₂ -value	0.928–0.947	0.939–0.951
Apparent diffusion coefficient	0.870–0.901	0.883–0.897
Coefficient of variation [$\times 10^{-3}$]		
T ₂ -value	6.6	7.1
Apparent diffusion coefficient	9.1	7.5

2-1 作製時間の比較

ホットスターラーを用いて5個作製した脳実質部ファントムの1個あたりの平均作製時間は213±48 minであった。同様に電子レンジを用いた場合では108±8 minであった。t検定より電子レンジを用いたファントムはホットスターラーを用いた方より有意に作製時間が短縮された(p<0.01)。

2-2 T₂値とADC値の比較

ホットスターラーを用いて5個作製した脳実質部ファントムのT₂値は83.82±0.55 msであった。電子レンジを用いて5個作製した脳実質部ファントムのT₂値は83.08±0.59 msであった。t検定より両方法によるT₂値に有意差は認めなかった(p=0.123)。また、ホットスターラーを用いて5個作製した脳実質部ファントムのADC値は $0.825 \times 10^{-3} \pm 0.007 \times 10^{-3}$ s/mm²であった。電子レンジを用いて5個作製した脳実質部ファントムのADC値は $0.818 \times 10^{-3} \pm 0.006 \times 10^{-3}$ s/mm²であった。t検定より、両方法によるADC値に有意差は認めなかった(p=0.057)。

2-3 T₂値とADC値による脳実質部ファントム内部の均一度評価

ホットスターラーを用いて5個作製した脳実質部ファントムのT₂値の均一度は0.928から0.947であった。電子レンジを用いて5個作製した脳実質部ファントムのT₂値の均一度は0.939から0.951であった。t検定より両方法によるT₂値の均一度は有意差を認めなかった(p=0.247)。ホットスターラーを用いて5個作製した脳実質部ファントムのADC値の均一度は0.870から0.901であった。電子レンジを用いて5個作製した脳実質部ファントムADC値の均一度は0.883から0.897であった。t検定より、両方法によるADC値の均一度は有意差を認めなかった(p=0.078)。

2-4 T₂値とADC値による作製方法別脳実質部ファントムの再現性評価

ホットスターラーを用いて5個作製した脳実質部ファントムのT₂値の変動係数は 6.6×10^{-3} であった。同様にADC値の変動係数は 9.1×10^{-3} であった。電子レンジを用いて5個作製した脳実質部ファントムのT₂値の変動係数は 7.1×10^{-3} であった。同様にADC値の変動係数は 7.5×10^{-3} であった。

2-5 ホットスターラーを用いて作製した急性期微小脳梗塞ファントムと電子レンジによるファントムの比較

両手法により作製した急性期微小脳梗塞ファントムのプロファイルカーブをFig. 3に示す。両方法ともDWI(b=0 s/mm²)では脳実質部ファントム内に封入した脳梗塞部ファントムは視認できない画像となったが、DWI(b=1000 s/mm²)では脳実質部ファントムより脳梗塞部ファントムが高信号となった。

3. 考 察

ホットスターラーを用いて作製した脳実質部ファントムと、電子レンジを用いて作製したものでは、作製時間に有意差が認められたが、ファントム内部のT₂値、ADC値、均一度や再現性に有意差は認められないことから、脳実質部ファントムは電子レンジを用いても作製可能と考える。

脳実質部ファントムの作製時間が電子レンジを用いた方法で有意に短縮した原因として、両手法の加熱過程に違いがあると考えられる。ホットスターラーを用いた場合の加熱は、そのヒーターの抵抗によるジュール加熱で熱源を作り、伝導、輻射、対流によりビーカやゼラチンとスクロースの混合溶液に熱を伝えるため内部の温度を急激に上げるのは不向きである¹³⁾。一方、電子レンジによる加熱は、マイクロ波帯の電磁波を用い

Fig. 3 Coronal image of the acute cerebral infarction phantom created using the hot stirrer and microwave oven.

- (a) Manufactured by the hot stirrer, $b=0$ [s/mm²]
 (b) Manufactured by the microwave oven, $b=0$ [s/mm²]
 (c) Manufactured by the hot stirrer, $b=1000$ [s/mm²]
 (d) Manufactured by the microwave oven, $b=1000$ [s/mm²]

て食品自体を加熱するため内部まで急速加熱が可能であり、ホットスターラーを用いた場合と加熱速度が大きく違う¹⁴⁾。このことから電子レンジを用いた場合の脳実質部ファントムの作製時間はホットスターラーを用いたものより有意に短縮したと考える。作製時間を更に短縮するためには、より高温でゼラチンを加熱すれば可能であると考えられるが、加熱を続けると急速に低分子化し、物性も低下するとされている¹⁵⁾。また、ゼラチンの粘度およびゼリー強度は、ゼラチンの分子量分布に関連があるとされている¹⁶⁾。そのため脳実質部ファントムの温度管理が重要となるが、今回の両手法では T_2 値、ADC 値に有意差はなく、加熱による影響は同程度であると考えられる。加熱手法として湯煎によりゼラチンを溶解する方法もあるが、お湯を沸かす機能を有しているものや場所が必要なこと、ビーカより大きな容器を必要とすること、お湯の温度管理が必要であることなどにより、予備実験を行ったのみであった。その結果脳実質部ファントムの作製時間は1割ほど延長した程度ではあったが、水を温める時間は入れていないため、電子レンジを用いた場合の方が簡単であると思われる。

T_2 値と ADC 値による脳実質部ファントム内部の均一度評価は、作製方法の違いによる大きなばらつきはなく、有意差も認められなかったことから、人力による攪拌でも問題ないと考える。ホットスターラーを用いた場合、ゼラチンとスクロースを投入した直後では 500 rpm で回転可能であったが、ゼラチンは水を含むと粘度が上昇し、攪拌子がうまく回転できない時間がある。また 500 rpm ではビーカ内は2層になり、底から4分の3程度は高濃度、その上方に低濃度で平衡状態となってしまう、均一に攪拌するためには最後に数分間、更なる高回転にする必要があった。ホットスターラーを用いて脳実質部ファントムを作製した場合は安定した速度で攪拌できる利点があるが、大量に作製した場合や、粘度の高い物質を溶解するにはトルク不足により攪拌不良が起こりうる。そのため大容量のホットスターラーによる作製も考えられるが、本体が高価である。以上より攪拌不良が起こり得る場合は、再現性も問題ない人力による攪拌が、安価で手間が少ない手段であると考えられる。

T_2 値と ADC 値による作製方法別脳実質部ファントムの再現性評価において、有意な差が認められな

かったことから、電子レンジを用いた脳実質部ファントムを複数個作製しても、その再現性はホットスターラーを使用して作製したファントムと変わらないと考える。更に、同時に複数個のファントムを作製する場合、ホットスターラーを用いると同数のホットスターラーが必要となるが、提案する電子レンジを用いた方法では、加熱時間が短いため一つのファントムを加熱後常温で攪拌、放置している間に他のファントムを加熱することができる。したがって、複数個作製する場合は電子レンジを用いたほうが短時間で作製可能となる。

ホットスターラーを用いて作製した脳実質部ファントムは、先行研究で作製した脳実質部ファントムと比べ、 T_2 値が 9.4% 程度短縮し、ADC 値も 5.0% 程度低下した。 T_2 値と ADC 値の変動の原因として、使用したゼラチン、スクロースのロット番号が先行研究と違うためと考える。スクロースは分子量も一定で試薬を使用した場合は大きく変動しないと考えられるが、一方ゼラチンは、分子量分布が非常に広く 1.5 万から 30 万ともいわれ組成が複雑とされる⁷⁾。また、高温抽出により得られるゼラチンの組成は更に複雑になるとされる⁷⁾。これらよりロット番号の違いは製造過程や原料などが違う可能性があり、 T_2 値や ADC 値に影響を与えることが考えられる。したがって、試薬を使用した場合でもロット番号の違いにより誤差が生じる可能性があるので注意が必要である。

本研究のリミテーションとして、1.5 テスラ装置で行ったため、3 テスラや低磁場装置では異なる結果になる可能性がある。両手法による急性期微小脳梗塞ファントムは T_1 強調画像 (T_1 -weighted image: T_1 WI) で撮像すると脳梗塞部ファントムが高信号となり、位置の確認が可能となる利点もあるが、 T_1 値は人体同等ではない。よって FLAIR や T_1 WI などで行えるファントムではない。また b 値 0, 1000 mm^2/s

で人体の急性期脳梗塞と同等の ADC 値を示すが、脳実質部、脳梗塞部ファントムとも mono-exponential を示すため、他の b 値で使用する場合は人体同等と限らない。22°C 前後に保たれている MRI 室内に保存していると、電子レンジを用いた場合でも先行研究と同様に約 1 週間でカビの発生が認められる。電子レンジを用いて作製する場合、電子レンジ非対応の容器や、攪拌子は使用できないなどが挙げられる。

4. 結 語

急性期微小脳梗塞ファントムを作製するにあたり、脳実質部ファントムをホットスターラーにより作製した場合、3~5 時間を要していた。今回提案した電子レンジを用いた方法により脳実質部ファントムを作製すると、作製時間が 2 時間以内に短縮できた。更に、 T_2 値、ADC 値、均一度、再現性はホットスターラーを用いた方法と比較しても有意差が認められなかった。また両方法により作製した急性期微小脳梗塞ファントムを撮像した結果からは明らかな違いは認められず、脳実質部ファントムは電子レンジを用いても作製可能であると考えられる。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、多大なるご助言をいただいた、群馬県立県民健康科学大学地域連携センターの皆さまにこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

なお、本研究の要旨は第 32 回日本診療放射線技師学術大会 (2016 年、岐阜市) にて発表した。

利益相反

筆頭著者および共著者全員が開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) 文部科学省, 厚生労働省. 人を対象とする医学系研究に関する倫理指針. 平成 26 年 12 月 22 日 (平成 29 年 2 月 28 日一部改正)
- 2) Tofts PS, Lloyd D, Clark CA, et al. Test liquids for quantitative MRI measurements of self-diffusion coefficient in vivo. *Magn Reson Med* 2000; 43(3): 368-374.
- 3) Lavdas I, Behan KC, Papadaki A, et al. A phantom for diffusion-weighted MRI (DW-MRI). *J Magn Reson Imaging* 2013; 38(1): 173-179.
- 4) Matsuya R, Kuroda M, Matsumoto Y, et al. A new phantom using polyethylene glycol as an apparent diffusion coefficient standard for MR imaging. *Int J Oncol* 2009; 35(4): 893-900.
- 5) 田村隆行, 笛吹修治, 秋山實利. 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. *日放技学誌* 2009; 65(11): 1485-1493.
- 6) Laubach HJ, Jakob PM, Loevblad KO, et al. A phantom for diffusion-weighted imaging of acute stroke. *J Magn Reson Imaging* 1998; 8(6): 1349-1354.
- 7) 高橋雅彦, 橋本真衣子, 上原真澄. 拡散強調画像用急性期微小脳梗塞ファントムの作製. *日放技学誌* 2018; 74(6): 531-538.
- 8) Olsrud J, Wirestam R, Brockstedt S, et al. MRI thermometry in phantoms by use of the proton resonance frequency shift method: application to interstitial laser thermotherapy. *Phys*

- Med Biol 1998; 43(9): 2597-2613.
- 9) Vassiliou VS, Heng EL, Gatehouse PD, et al. Magnetic resonance imaging phantoms for quality-control of myocardial T1 and ECV mapping: specific formulation, long-term stability and variation with heart rate and temperature. J Cardiovasc Magn Reson 2016; 18(1): 62.
 - 10) 宮地利明. 2.2.2 画像均一性. 放射線技術学スキル UP シリーズ 標準 MRI の評価と解析. オーム社, 東京, 2012: 40-41.
 - 11) Rasband WS. ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 1997-2012, <http://imagej.nih.gov/ij/> (Accessed 2019.10.24).
 - 12) 神田善伸. フリー統計ソフト EZR (Easy R) で誰でも簡単統計解析. 東京: 南江堂, 2014.
 - 13) 大藪 一. 最近の電子レンジと電磁調理器. 日本調理科学会誌 2001; 34(2): 242-249.
 - 14) 酒井 昇. 食品の誘電物性とマイクロ波加熱. 日本食品工学会誌 2010; 11(1): 19-30.
 - 15) 白井邦郎. 食用ゼラチン. 調理科学 1978; 11(1): 23-30.
 - 16) 大野隆司, 小林裕幸, 水澤伸也. 液体クロマトグラフィーによるゼラチンの分子量分布の測定 (III). 日本写真学会誌 1984; 47(4): 237-247.

問合先

〒372-0817 伊勢崎市連取本町 12-1
伊勢崎市民病院中央放射線科 橋本真衣子