

鉛玉を用いたMRI用不均一磁場補正pad の有用性評価

Evaluation of usefulness of pad filled with lead sphere to correct inhomogeneous magnetic field for MRI

中西 恒平,染矢 啓太

医療法人秋田病院 放射線科

Key words: MRI, inhomogeneous magnetic field, magnetic susceptibility, strong diamagnetism, lead

[Abstract]

Pads for correction of the inhomogeneous magnetic field are sometimes used for MRI. Although diamagnetic substance which has similar magnetic susceptibility to water is generally selected as material for the pad, material with stronger diamagnetism than that of water may have higher ability for correction of inhomogeneous magnetic field compared with conventionally used material. To clarify the ability of the material with strong diamagnetism, we evaluated the ability of lead using agar phantom and chicken. In this study, lead had superior ability for correction of the inhomogeneous magnetic field to that of conventionally used material. Moreover, there was correlation between the ability of material and the product of magnetic susceptibility and volume. The results suggested that material with strong diamagnetism is suitable for pads for correction of the inhomogeneous magnetic field.

【要 旨】

MRIでは不均一磁場補正padを用いた撮像が行われることがある.padの素材には水に近い磁化率を有しているものが選択される が、それらより強い反磁性を有する素材の方が高い不均一磁場補正能を有していると考えられる.われわれは強い反磁性を有する素 材の磁場補正能を明らかにすることを目的とし、寒天および鶏肉を用いて鉛が有する磁場補正能の評価を行った.本研究では鉛は従 来のpad素材より優れた磁場補正能を有していた.また素材の磁場補正能と体積磁化率積は相関関係にあった.以上の結果から強い 反磁性を有する素材が磁場補正用padの素材として適していることが示唆された.

緒言

MRIは高い組織間コントラストを有した画像を得 ることができるモダリティーとして臨床に広く普及し ており、さまざまな部位の画像診断で重要な役割を 担っている.しかし、皮膚面のような空気と組織が接 する部位では磁化率変化が急峻になるため局所的に 磁場が不均一になり、画像ひずみやchemical shift selective fat suppression (CHESS) 法による脂肪 抑制のムラが生じてしまうことがある.特に、手指や 頸部のような複雑な形状やくびれた形状をしている部 位では、不均一局所磁場の影響が顕著であることが知 られており、これらの部位ではしばしば磁場補正 pad を用いた撮像が行われる.磁場補正padは皮膚面と空 気の磁化率差を軽減するために用いられるため, pad の素材には人体や水の磁化率-9.0ppm (parts per million)¹⁾ に近い磁化率を有しているものが適してい る.しかし、水を磁場補正padに用いるとT2強調画 像でpadが高信号域として描出され、画像ひずみや脂

NAKANISHI Kouhei, SOMEYA Keita

Department of Radiology, Akita Hospital Received December 17, 2020; accepted July 27, 2021 肪抑制ムラ以外のアーチファクトの原因となるリスク も伴ってしまう.そのため磁場補正 padの素材は画像 上で無信号域となるものが好ましい.こういった背景 から磁場補正 padの素材には水と磁化率が近く,画像 上で無信号域となる生米が適しているという報告がな されたが¹⁾,食品は衛生的に問題となる場合があるた め米以外の素材を用いた磁場補正 padの研究が行わ れている^{1~3)}.固体の素材をpadに用いる場合,素材 間に隙間が生じ padに空気が混入するため,磁場補正 用 pad は pad に詰めた素材と空気の混合物として見 なすことができる.混合物の磁化率 $\chi_{mixture}$ は以下の式 (1)で表される⁴⁾.

$$\chi_{\text{mixture}} = f_{\text{p}} \chi_{\text{a}} + (1 - f_{\text{p}}) \chi_{\text{b}} \tag{1}$$

 χ_a および χ_b は混合物を構成する物質aおよび物質b の磁化率, f_pは混合物の体積のうち物質aの体積が占 める割合を表している.空気の磁化率が0.36ppm⁵⁾で あることを踏まえると,式(1)より磁場補正用 padの 素材には-9.0ppm程度の人体に近い磁化率を有する 素材ではなく,-9.0ppmより絶対値が大きな磁化率 を有する反磁性体を素材として用いた方が $\chi_{mixture}$ は 人体に近い磁化率になり,良好な不均一磁場補正効果 が得られると考えられる.しかし,米より強い反磁性 を有する素材の磁場補正能の検討はいまだ行われてい ない.従って本研究では,米より強い反磁性を有する 素材の有用性を明確にするため,鉛が有する磁場補正 能の評価を行った.

方 法

1-1 寒天ファントムを用いた磁場補正能の評価 磁場補正pad作成前に、少量のpad素材と自作の寒 天ファントムを用いて素材の磁場補正能を評価した. 粉寒天15gを精製水750mlに加え水溶液を作成し、こ の水溶液を沸騰させた後、MRI撮像室内の室温25度 と同じになるまで冷やし、寒天ファントムを作成した. Fig.1に、自作した寒天ファントムを示す.ファントムの



Fig.1 Self-developed agar phantom



Fig.2 Materials used for correcting inhomogeneous magnetic field in this study

サイズは縦135mm,横190mm,厚さ28mmである. 寒天ファントムは中央に深さ28mm,体積75mlの 円柱状空洞を有している.この空洞に磁場補正材を 詰めた状態と詰めていない状態で,spin echo (SE) single-shot echo planar imaging (EPI) 法および gradient echo (GRE) 法を用いた撮像を行い,得 られた画像のひずみを比較した.磁場補正材には純度 96%の2mm径鉛玉,生米,アクリル (Poly Methyl Methacrylate : PMMA)樹脂ペレット (三菱ケミカ ル株式会社),酸化鉄含有率0.1%の0.5mm径ガラス ビーズ (ポッターズ・バロティーニ株式会社)を使用 し,それぞれの補正材が有している磁場補正能の比較 を行った.Fig.2に,使用した磁場補正材の画像を示す.

PMMAの磁化率は-9.1ppm⁶⁾, 生米の磁化率は -10.2ppm¹⁾, 鉛の磁化率は-15.8ppm⁷⁾, ソーダ石灰 ガラスの磁化率は-6.1ppm⁶⁾ である. なおソーダ石灰 ガラスの磁化率-6.1ppmは, 酸化鉄含有量0.08%の ソーダ石灰ガラスに対する値である. これらの素材の 磁化率と水の磁化率および空気の磁化率を Table 1に まとめた. 磁化率には単位質量当たりの磁化率を表す 質量磁化率や,単位体積当たりの磁化率を表す体積磁 化率など複数の表現法が存在する. 一般的には単に磁 化率というと体積磁化率のことを指すため,本研究でも 磁化率は体積磁化率のことを指す用語として使用する.

1.5テスラのMRIシステム(Vantage Elan, Canon Medical Systems)とOctave SPEEDER ヘッドコイ ルを用いて、ファントムの中心を磁場中心に設置し撮 像を行った. EPI法の撮像パラメーターは、当院の頭 部拡散強調画像撮像用のものに準ずるものを使用し、 repetition time (TR) 3,426ms, echo time (TE) 94ms, bandwidth (BW) 1,302Hz/pixel, slice thickness 5.0mm, slice gap 1.0mm, number of slices 19, matrix 160 × 256, field of view (FOV) 23 × 23cm, b factor 1,000 である.またGRE法の撮 像パラメーターは、当院の頭部磁化率強調画像撮像用 のものに準ずるものを使用し、TR 551ms, TE 15ms, BW 122Hz/pixel, slice thickness 5.0mm, slice gap 1.0mm, number of slices 19, matrix 256 × 320, FOV 23 × 23cm, flip angle 25 である.

Table 1 Magnetic susceptibility (χ) of materials for correcting inhomogeneous magnetic field (SI units)

	PMMA	Rice	Lead	Glass (Soda-lime glass)	Water	Air
χ (ppm)	-9.1	-10.2	-15.8	-6.1	-9.0	0.36

画像ひずみはFig.3に示す方法で評価を行った. ImageJ (v.1.8.0_172, National Institute of Health)を用いてファントム画像の空洞部に内接する 円形region of interest (ROI) と外接する円形ROI をそれぞれの中心が同じ位置になるように設定し、そ れらの半径の比(R1/R2)を計算した.2つの円形ROI を設定する際はImageJでファントム空洞部のエッジ 抽出を行い、エッジに内接もしくは外接するように ROIを配置した.画像ひずみはファントムの中心を横 断するスライスを用いて評価した.

Fig.4に, 円形ROIの設定例を示す. Fig.4はEPI法 で撮像した冠状断の画像で、位相エンコード方向以外 のパラメーターは固定して撮像したものである. Fig.4 (a) は位相エンコード方向を静磁場の方向と直交する ように設定して得た画像, Fig.4 (b) は位相エンコー ド方向が静磁場の方向と平行になるように設定して得 た画像である. Fig.4内に矢頭で示してあるように,パ イルアップアーチファクト⁸⁾ が空洞辺縁に生じた場合 はパイルアップアーチファクトのエッジは無視し、空 洞のエッジに接するように円形ROIを設置してR1/ R2を計算した.またEPI法で位相エンコード方向を静 磁場の方向と平行するように設定した際は画像ひずみ およびアーチファクトがより顕著に表れ、空洞のエッ ジとアーチファクトのエッジを鑑別することが困難で あったため、EPI法で得た画像では、位相エンコード 方向を静磁場の方向と直交するように設定して得たも のでのみR1/R2を計算した。GRE法で撮像した画像 では, 位相エンコード方向を静磁場の方向と直交する

ように設定して得たものと、平行するように設定して 得たものの両方でR1/R2を計算した.またそれぞれ の撮像条件で5回ずつ撮像を行い,R1/R2の平均値と 標準偏差を求めた.

比較のためにX線CT装置 (Activision 16, Canon Medical Systems)を用いて不均一局所磁場によるひ ずみがない寒天ファントム画像を取得した. CT画像の 撮影条件は,管電圧120kV,管電流時間積50mAs,ス ライス厚5.0mmである.

1-2 補正材の体積磁化率積と磁場補正能の相関 評価

1-1で使用した磁場補正素材に対して式(2)を用い 体積磁化率積Vxを算出した.

Vχ = (ファントムの空洞に詰めた素材の質量/
 素材の密度) × (素材の磁化率)

生米は密度が明確でないため、ファントムの空洞内 に生米を詰めた状態で空洞から溢れる寸前まで精製水 を注ぎ込み、注ぎ込んだ精製水の体積をファントム空 洞の体積から差分して空洞内の生米の体積を求めた.

また空洞内には素材間の隙間に空気も混入するため, 空気の体積磁化率積V_{Xair}を算出し空洞全体の体積磁化 率積V_{Xoverall}を式(3)で算出した.空洞内の空気の体積 は,空洞の体積から詰めた素材の体積を差分して求めた.

$$V\chi_{overall} = V\chi + V\chi_{air}$$
(3)



Fig.3 Method for quantitative evaluation for image distortion



Fig.4 Example for measurement of R1/R2 value of EPI images acquired with phase encode direction which was perpendicular (a) and parallel (b) to direction of static magnetic field

体積75mlの水の体積磁化率積 V_{Xwater}との差 V_{Xoverall}-V_{Xwater}を算出し, V_{Xoverall}-V_{Xwater}の絶対値と 1-1で算出したR1/R2との相関係数を求めた.

1-3 鶏肉を用いた磁場補正能の評価

合計2kgの鉛玉を0.03mm厚ポリエチレン袋(旭化 成ホームプロダクツ株式会社)に封入し、体積300ml の磁場補正padを作成した.磁場補正padの体積 300mlは鉛玉の体積と鉛玉間の隙間に存在する空気 の体積の合計値で,鉛padの単位体積当たりの質量は 6.9g/cm³である.また比較のために生米240gでも体 積300mlの磁場補正padを作成した.Fig.5に,作成 した磁場補正用padを示す.

ポリエチレン袋に封入した鶏肉(手羽先)を磁場中 心に設置し,作成した磁場補正padを鶏肉の上に置い た状態で撮像を行うことで,被写体に対するpadの磁 場補正能を評価した.撮像には4チャンネルフレキシ ブルSPEEDERコイルを使用した.位置決め画像撮像 後にシミングを行い,シミングを行った際に得られる 位相画像を用いて磁場補正能を評価した.位相画像の 画素値にムラがあるほど磁場が不均一であることを意



Fig.5 Developed rice pad and lead pad for correction of inhomogeneous magnetic field



Fig.6 Position of ROI on chicken wing

味しており、この位相画像を基にシムコイルに印加す る電流を調整することでシミングが行われる⁹⁾. Vantage Elanでは、シミング前後での位相画像を得 ることができるため、本研究ではシミング後の位相画 像を用いた.得られた画像にVantage Elanのコン ソール上でROIを設置し位相画像のstandard deviation (SD) 値を測定した. ROI は手羽先の前腕 部と手根-中手部の2カ所に設定し、それぞれのROI 位置で、padを用いなかった場合のSD値(SD_{non-pad}) を基準としたpadを用いた場合のSD値(SDpad)の相 対値 (SD_{pad}/SD_{non-pad}) を算出した. Fig.6に, 用い た手羽先の画像とROIの位置を示す.また手羽先を5 つ用意し、それぞれのサンプルで同様の測定を行い、 Mann-WhitneyのU検定を用いてSD値の有意差検 定を行った. 有意水準は0.05とした. シミングを行っ た際の撮像条件は, TR 200ms, TE 4.8/9.6ms, BW 488Hz/pixel, slice thickness 5.0mm, slice gap 0mm, number of slices 15, matrix 64×64 , FOV 15×15cmである.また位置決め画像の撮像条 件は, TR 32.8ms, TE 4.0ms, BW 244Hz/pixel, slice thickness 8.0mm, slice gap 2.0mm, number of slices 3, matrix 128 × 256, FOV 25 ×25cmである.

結 果

2-1 寒天ファントムを用いた磁場補正能の評価 Fig.7 に, EPI法で撮像したファントム画像の空洞部 分を示す. 位相エンコード方向は静磁場の方向と直交 する方向である. また比較のためにファントムのCT 画像もFig.7内に示してある. 磁場補正素材を詰めず



Fig.7 EPI and CT images of cavity of phantom with and without materials

80

に撮像した画像のひずみが最も大きく,鉛を詰めて撮 像した画像のひずみが最も小さくなった.また鉛に起 因する顕著なアーチファクトは現れなかった.



Fig.8 R1/R2 values of images acquired with EPI



Fig.9 GRE images acquired with phase encode direction which was perpendicular to direction of static magnetic field

Fig.8に, EPI法で撮像した画像の平均R1/R2値を示 す.R1/R2値が大きいほどひずみが小さいことを意味す る. 鉛を使用した際の値が最も大きくなった. 補正素材 を用いずに撮像した画像はひずみが大きく, imageJで エッジ抽出不可であったためR1/R2を算出できなかっ た.

Fig.9に、GRE法で位相エンコード方向を静磁場の 方向と直交するように設定して得たファントム画像を 示す. EPI法で得た画像と比較すると画像のひずみが 小さくなった.

Fig.10に, GRE法で位相エンコード方向を静磁場の 方向と平行になるように設定して得たファントム画像を 示す.補正素材を用いなくても画像のひずみは小さく なった.

Fig.9および**Fig.10**に示したファントム画像の平 均R1/R2値を**Fig.11**に示す. 位相エンコード方向を



Fig.10 GRE images acquired with phase encode direction which was parallel to direction of static magnetic field



Fig.11 R1/R2 values of GRE images acquired with phase encode direction which was perpendicular or parallel to direction of static magnetic field

変更してもR1/R2値の変化は小さかった.また補正 素材なしのR1/R2値は、補正素材使用時の値と大き な差はなかった。

2-2 補正材の体積磁化率積と磁場補正能の相関 評価

Table 2に,用いた磁場補正素材の体積と体積磁化 率積を示す.算出した生米の体積と空洞に詰めた生米 の質量から求めた生米の密度は1.1g/cm³となり,文 献値1.1~1.4g/cm^{3 10)}と整合性の取れた値となっ た.

Fig.12に、V χ overall –V χ waterの絶対値を横軸に、EPI 法で撮像した画像の平均R1/R2値を縦軸に設定しプ ロットした散布図を示す.相関係数Rは-0.91となり、 V χ overall –V χ waterの絶対値とR1/R2値には強い負の相 関関係が存在することが確認できた.なお、GRE法 で得た画像は補正素材を用いない場合でも画像のひず みが小さく、本研究の実験系におけるGRE法で得た R1/R2値は、磁場補正能を評価する指標としては適し ていないと考えられたため、V χ overall –V χ waterの絶対値 とR1/R2値の相関係数の算出は行わなかった.

2-3 鶏肉を用いた磁場補正能の評価

得られた冠状断位相画像の一例をFig.13に示す.

Fig.13は同一サンプルの画像である.また位相画像の スライス位置を明確にするために,Fig.13には矢状断 位置決め画像も示してある.鉛padを用いて撮像した 位相画像内の破線は位置決め画像のスライス位置を, 位置決め画像内の破線は位相画像のスライス位置を表 している.鉛padを用いて撮像した位相画像の画素値 が最も均一であり,padを用いない場合が最も不均一 となった.またくびれた形状をしている手根-中手部



Fig.12 R1/R2 values of EPI images as function of absolute values of $V\chi_{overall} - V\chi_{water}$

 Table 2
 Volume of air and material for correcting inhomogeneous magnetic field in cavity and product of volume and magnetic susceptibility

	Volume of material [ml]	Volume of air [ml]	V χ overall [ml]	V χ _{overall} - V χ _{water} [ml]
Lead	45.9	29.1	-714.0	-39.0
Rice	32.7	42.3	-319.0	356.5
PMMA	51.7	23.3	-462.0	213.0
Glass	46.8	28.2	-275.3	400.0



Fig.13 Phase images of chicken wing after shimming and locator image for phase images



Fig.14 Relative SD values at forearm and carpus-metacarpus of chicken wing

で磁場が明確に不均一になった.

Fig.14に,5つの手羽先で測定した相対SD値の平 均と標準偏差を示す.全てのサンプルの全てのROI位 置において,鉛padを用いて撮像した画像で有意に最 も小さなSD値が得られた.

考察

寒天ファントムをEPI法で撮像した実験では, 空洞 に詰めた素材が有する磁化率の絶対値が大きいほど磁 場補正能が高くなった. 0.5mm径微小ガラスビーズ を用いた先行研究では、微小ガラスビーズが生米より 高い局所磁場補正能を有していると報告されている²⁾. しかし、本研究では生米の磁場補正能の方が高くなっ た. この結果の相違は,ガラスビーズに用いているガラ ス種の違いが起因していると予想できる。一般的にガ ラスといえばソーダ石灰ガラスを指すことが多く、本 研究でもソーダ石灰ガラスを用いている.しかし,一 般的なソーダ石灰ガラスには強磁性体である酸化鉄が 0.08%~0.1%程度含まれており,反磁性は弱くなる⁶. そのため本研究では磁場補正能が低くなったと考えら れる.一方で,光学用の透明度が高いソーダ石灰ガラス には酸化鉄が含まれていないため、磁化率は-11ppm 程度になる⁶⁾.またケイ酸ガラスも同程度の磁化率を有 している⁶. これらのガラスを用いれば, 生米より高い 磁場補正効果を得ることができると予想される。

本研究では、磁場の不均一に敏感なEPI法および GRE法³⁾を用いて磁場補正能を評価した.しかし、本 研究の実験系においては、GRE法で撮像した画像で は磁場補正素材を用いない場合でも画像ひずみが小さ く,磁場補正素材を用いた際の画像ひずみと大きな差 は現れなかった.一般的にも,GRE法よりEPI法の方 が磁化率の差がアーチファクトとして現れやすいとさ れており¹¹⁾,本研究の結果と一致する.以上のことか ら,素材の磁場補正能の評価にはGRE法よりEPI法の 方が適していると考えられる.

またわれわれは、VXoverall –VXwaterの絶対値と磁場補 正能に強い相関があることを明らかにした.この相関関 係からVXoverall –VXwaterは、磁場補正用padに用いる素 材、素材の形状およびサイズ選択の重要な指標である といえる.またこの相関関係は、pad素材として数ミリ 程度の固体を用いる場合、従来の見解とは反し水に近 い磁化率を有する素材より、水より強い反磁性を有する 素材がpad素材として適していることを示している. 鉛以外の衛生的に問題にならず強い反磁性を有してい る素材としては、磁化率が–10ppmのポリ塩化ビニー ル⁶や前述したような光学ガラスなどが挙げられる⁶.

われわれは鶏肉を用いて,動物組織に対しても 2mm径の鉛玉が高い磁場補正能を有していることを 示した.本研究では人体を用いた評価は行っていない が,ファントム内空洞の画像ひずみ改善効果が高い磁 場補正素材ほど,人体撮像時の不均一脂肪抑制効果改 善能が高いことが先行研究により報告されている³⁾. このことから,画像ひずみ改善効果が高かった2mm 径の鉛玉を用いることで,人体に対しても生米より良 好な脂肪抑制効果が得られることが示唆された.

鉛padは質量が大きいことから、患者が痛みや外傷 を有する部位での使用は慎重に検討しなければならない.一方で, 踵などの不均一な脂肪抑制効果が起こり やすく, padを撮像部位の上ではなく下もしくは周り に設置できる部位で,鉛padは有用であると考えられ る.またpadの質量が大きいことにはデメリットだけ ではなく,手指などの撮像部位の上に設置すると患者 体動の抑制につながるというメリットも存在する.拡 散強調画像がリウマチで手および手関節に生じる滑膜 炎の撮像に有用であることが報告されており¹²⁾,鉛 padはリウマチ患者の撮像に有用であると考えられ る.

吸着や熱傷事故につながる恐れがあるため, MRI室 内への金属の持ち込みを禁止にしている施設は多い. 反磁性体である鉛は吸着を起こすことはないが, MRI 撮像中に鉛が加温される現象はすでに報告されてい る^{13).14)}.しかし, それらの報告では, 鉛の温度上昇は最 大で0.2度程度と軽微であり,体内に鉛製の銃弾が遺 残している患者であってもMRI検査を行うことがで きると結論付けている.これらの報告から, 鉛padを 撮像に用いても熱傷につながる可能性は低いと考えら れる.しかし,事故を起こさないよう万全を期すために も, 鉛padの発熱特性にはさらなる検証が必要である.

結 語

本研究では、2mm径の鉛玉を用いて高い不均一磁 場補正効果を得ることに成功した.鉛は質量が大きい などのデメリットが存在するが、安価で良好な不均一 磁場補正能を有するpad素材として有望であると言 える.またわれわれは、VXoverall-VXwaterの絶対値と磁 場補正能に強い相関があることを明らかにした.この 相関関係は水に近い磁化率を有する素材より、強い反 磁性を有する素材が局所磁場補正用padの素材とし て適していることを示した.本研究の結果は、今後の 磁場補正用padに関する研究においてpad素材決定 の一助になる有用なものであると考えられる.

利益相反

本研究に関する利益相反はない.

表の説明

Table 1 不均一磁場補正に用いた素材の磁化率(χ)(SI単位系) Table 2 空洞内の空気と不均一磁場補正に用いた素材の体積 および体積磁化率積

図の説明

- Fig.1 自作した寒天ファントム
- Fig.2 本研究で不均一磁場補正に用いた素材

- Fig.3 画像ひずみの定量的な評価方法
- Fig.4 静磁場方向と直交する位相エンコード方向(a)と平 行する位相エンコード方向(b)で撮像したEPI画像を 用いたR1/R2値測定の例
- Fig.5 作成した不均一磁場補正用米padと鉛pad
- Fig.6 手羽先の画像に設定したROIの位置
- Fig.7 補正素材ありおよび補正素材なしのファントム空洞の EPI画像およびCT画像
- Fig.8 EPI法で撮像した画像のR1/R2値
- Fig.9 静磁場方向に直交する位相エンコード方向で取得した GRE画像
- Fig.10 静磁場方向に平行する位相エンコード方向で取得した GRE画像
- Fig.11 静磁場方向に直交もしくは平行する位相エンコード方 向で得たGRE画像のR1/R2値
- Fig.12 VX_{overall}-VX_{water}の絶対値に対するEPI画像のR1/R2値
- Fig.13 シミング後の手羽先の位相画像と位置決め画像
- Fig.14 手羽先の前腕および手根-中手部における相対SD値

参考文献

- Moriya S, et al.: Fat-suppressed MR images of both hands obtained using CHESS can be improved by rice pads. Eur J Radiol, 81, 2318-2322, 2012.
- 2) 椎名亮介,他:微小ガラスビーズパッドを使用した頸部および手指のMRI 脂肪抑制効果の向上について.日放技学誌, 75,446-453,2019.
- 池口裕昭,他:脂肪抑制 Magnetic Resonance Image のためのポリスチレンボール弾を用いた静磁場不均一軽減 補助具の試作と効果の検討.日放技学誌、69,71-79, 2013.
- J. A. Hopkins, et al.: Magnetic Susceptibility Measurement of Insoluble Solids by NMR: Magnetic Susceptibility of Bone. Magnetic resonance in medicine, 37, 494-500, 1997.
- 5) R. S. Davis: Equation for the volume magnetic susceptibility of moist air. Metrologia, 35, 49-55, 1998.
- M. C. Wapler, et al.: Magnetic properties of materials for MR engineering, micro-MR and beyond. J Magn Reson, 242, 233-242, 2014.
- J. F. Schenck: The role of magnetic susceptibility in magnetic resonance imaging: MRI magnetic compatibility of the first and second kinds. Med Phys, 23, 815-850, 1996.
- J. P. Dillenseger, et al.: An illustrative review to understand and manage metal-induced artifacts in musculoskeletal MRI: a primer and updates. Skeletal Radiol., 45, 677-688, 2016.
- 原田雅史,他:MRスペクトロスコピーの定量化一臨床応 用の可能性と今後の課題一. Med Imag Tech, 17, 639-644, 1999.
- 10) 食品科学便覧編集委員会:食品科学便覧. 共立出版(株), p.228, 1978.
- K. Rafat Zand, et al.: Artifacts and Pitfalls in MR Imaging of the Pelvis. JOURNAL OF MAGNETIC RESO-NANCE IMAGING 26, 480-497, 2007.
- 12) X. Li, et al.: Diffusion-weighted MR imaging for assessing synovitis of wrist and hand in patients with rheumatoid arthritis: A feasibility study. Magn Reson Imaging, 32: 350-353, 2014.
- 13) R. D. Dedini, et al.: MRI issues for ballistic objects: information obtained at 1.5-, 3- and 7-Tesla. The Spine Journal, 13, 815-822, 2013.
- 14) A. S. Smith, et al.: MR of ballistic materials: imaging artifacts and potential hazards. American journal of neuroradiology, 12, 567-572, 1991.