

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500516

研究課題名(和文) 脂肪組織温度画像化の定量性改善のための脂肪酸磁気共鳴信号の温度依存性の探求

研究課題名(英文) Analysis of temperature dependence of fat proton magnetic resonance signal for quantitative temperature imaging

研究代表者

黒田 輝 (Kuroda, Kagayaki)

東海大学・情報理工学部・教授

研究者番号：70205243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：乳房や骨髄などの集束超音波治療を安全・有効に施行するため、脂肪組織の温度を鎖状メチレン基プロトンの磁気共鳴スピン格子緩和時間(T1)を用いて非侵襲的かつ定量的に画像化する技術の確立を目指した。当初、T1の温度依存性をヒト脂肪を構成する数種の脂肪酸に分けて検討することを想定していたが、研究開始当初に、脂肪酸の各化学シフト成分の信号強度の比が温度に対して不変であることを新たな知見として見出した。そこで研究計画をやや変更し、信号強度比を先験情報として固定し9成分の強度を推定すると、SN比が悪い場合でも堅牢に鎖状メチレン基プロトンのT1が測定できることを示しこれに基づく温度分布画像化法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In order to execute high intensity focused ultrasound (HIFU) therapy for breast and bone marrow safely and effectively, we planned to establish a noninvasive and quantitative temperature imaging technique using spin-lattice relaxation time (T1) of proton of methylene chain observed by magnetic resonance imaging (MRI). Based on a new finding that the signal intensity ratio of the chemical shift components of fatty acid in bovine and porcine tissues is insensitive to temperature, we have proposed a novel T1 estimation technique using the ratio among the nine fat signal components as a prior knowledge in the image processing following multiple-point Dixon and multiple flip angle imaging. The usefulness and robustness of the technique was demonstrated with numerical simulation.

研究分野：生体医工学

キーワード：MRI 温度 非侵襲 画像 脂肪 T1 メチレン 信号

1. 研究開始当初の背景

ヒトは生まれたときには温かく、おおよそ 36-37°C 程度の体温を維持して生き、やがて冷たくなって死んでゆく。体温は全ての生体にとって、細胞から個体に至るあらゆるレベルにおける活動状態に影響を与える、あるいは状態を反映する、最も重要な指標の一つである。生体は侵襲によって著しく影響を受けるため、このような体温の計測には非侵襲性が要求される。さらに体内の空間的な温度勾配を考えると、計測結果は画像として提供されるべきである。これらのことから体内温度分布の非侵襲画像化は生体医工学上の重大な課題として存在する。臨床的には非侵襲温度分布画像化はあらゆる温熱療法のモニタ技術の要であると共に、定量精度の向上により組織の代謝状態をはじめとする生理的情報をもたらす可能性がある。申請者らの研究はこのような体温の非侵襲温度分布画像化を MRI (Magnetic Resonance Imaging, 磁気共鳴画像化法) によって実現してきた。

このような MR による非侵襲温度分布画像化においてこれまで余り着目されていなかったのは、脂質含有率の高い組織の温度の定量である。重要な対象として乳房や骨髄がある。右図は骨転移巣の集束超音波治療⁽¹⁾の概念図である。治療部位への適切な熱投与と周囲正常組織の保護のために照射部位と接した骨髄の温度を知る必要がある。このようにがんの骨転移や乳がんに対する集束超音波治療では皮下や骨髄の脂肪成分の温度計測が必須である。

我々は 2009~2011 年度研究 (科研費課題番号 21500414) において、乳がん治療への応用を目指して脂肪・水混在組織に対する温度分布画像化法を検討し、メチル基あるいはメチレン基プロトンの T_1 により温度分布が定量できることを示した。これを基に水・脂肪が混在した組織に対して多点ディクソン法による成分分離と多フリップ角による緩和時間検出を組み合わせた新しい撮像シーケンスを創出し温度画像を求められることを示した。さらに水プロトンの共鳴周波数と脂肪メチレン基のプロトンの縦緩和時間を同時に検出し、各々のパラメータを温度に換算し、得られた 2 つの温度画像を水と脂肪の含有率に比例した重みで加算し、水脂肪混成対象の温度分布画像を得ることに成功した。この研究過程において脂肪酸プロトンの緩和時間の温度依存性が各成分プロトンで異なること、ならびに同じ成分のプロトンであればそれを含む脂肪や油の種類に依らず温度係数がほぼ一樣であることを示してきた。しかしながら実用性に重点をおいて研究を進めたため、このような、成分による温度依存性の違いの理由の学術的解明、そこから派生する応用拡大や定量性改

善の可能性が未だ見えていない。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は乳房や骨髄などの集束超音波治療を安全かつ有効に施行するため、脂肪組織の温度を非侵襲的かつ定量的に画像化する技術の確立である。特に本年度から 3 年間の研究では 2009~2011 年度研究 (課題番号 21500414) において検討・開発した、メチル基の T_1 と水プロトン磁気共鳴周波数に基づく脂肪・水混在組織に対する温度分布画像化法の精度改善を目指した。これまで乳がんの集束超音波治療における実用性を優先したため、脂肪内のプロトン成分の T_1 の温度依存性の物理的解釈や対象を骨髄とした場合の帯磁率効果の影響の検討は課題として残してきた。

本研究では当初、この温度依存性を、ヒト脂肪を構成する数種の脂肪酸 (オレイン酸、パルミチン酸など) にブレイクダウンしてさらに詳細に検討すると共に、帯磁率効果の影響を精査することを想定していたが、研究開始当初に、動物由来脂肪酸の各化学シフト成分の信号強度比が温度によって変化しないことが見いだされたため、研究計画をやや変更して実施し、骨転移や乳がんに対する温度分布画像化法の精度改善を図った。

3. 研究の方法

(1) 脂肪酸のプロトン化学シフト成分の信号強度の温度依存性

脂肪酸分子内の異なる位置にある水素原子核 (プロトン) に由来する磁気共鳴分光スペクトルの強度の相対的な関係を詳細に調べた。ヒト脂肪組織と同様にパルミチン酸、ステアリン酸、リノール酸、ミリスチン酸などを有するウシならびにブタの摘出脂肪組織片を直径 5 mm の NMR 用試料管に高さ 40 mm になるように詰めた。空気と脂肪組織の界面における磁化率の不整合による磁場の不均一を避けるため、組織片の間の気泡を静脈留置針とシリンジを用いて可能な限り取り除いた。

試料管を 11T の NMR 分光器 (AV500, Bruker) にセットし、ブロー空気の温度を変えることによって温度制御しながらプロトンスペクトルを観測し、成分毎の信号強度及び T_1 を測定した。温度は室温から 60°C まで上昇させた後、室温まで下降させた。成分としては $\text{CH}=\text{CH}$, CHO , CH_2O (left), CH_2O (right), $\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}=\text{}$, $\text{C}=\text{C}-\text{CH}_2$, $\text{O}=\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2$, $(-\text{CH}_2)_n$, CH_3 に着目した。信号取得の条件は以下の通りとした; 反転時間 (Inversion Time, TI), 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600ms; パルスの繰り返し時間 (Repetition Time, TR), 20000ms; 設定温度, 室温, 30, 40, 50, 60°C (加温過程), 50, 40, 30, 20°C (冷却過程)。

取得したデータから脂肪酸成分比の温度依存性を検討するため、脂肪酸成分ごとの信号強度と温度係数を求めた。また、信号強度比と温度の相関係数を求めその妥当さを T 検定を用い検討した。得られた温度依存性の回帰データから、室温における直鎖メチレン基 ((-CH₂)-n) を基準にした信号強度及び緩和時間の成分比を求めた。

(2) 先験情報の利用による信号処理の改善
水脂肪分離のための多点ディクソン法においては SPGR (Spoiled Gradient Recalled Acquisition in Steady State) 信号を用いた。この信号は全ての脂肪酸成分の信号が、異なる位相で重畳されたものである。SN 比が低い場合には炭素の 2 重結合部位にあるプロトン (CH=CH, C-CH₂-C=, C=C-CH₂, O=C-CH₂-CH₂) ならびにその他 (CHO, CH₂O (left), CH₂O (right)) の、信号強度の低い成分の振幅を未知数として推定に含めると、T₁ の測定を行いたい(-CH₂)-n ならびに CH₃ の推定精度が低下する可能性がある。一方、これらの信号を単純に無視した場合には、モデル関数と信号の構成に乖離が生じ、やはり推定精度が低下する可能性がある。

この問題を解決するため、先験情報として脂肪酸成分の周波数だけでなく、信号強度比も既知かつ温度不感として固定する方法を提案した。この方法により未知数を減らした場合に、SN 比に対して T₁ の推定精度がどのように変化するのかを詳細に検討した。

提案したモデル式は IDEAL (Iterative Decomposition of water/fat using Echo Asymmetry and Least-squares estimation) 法におけるモデル式を、先験情報に基づいて推定を行えるよう、以下のように修正した。

$$\mathbf{S} = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\rho} \quad [1]$$

$$\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1^R \ \mathbf{S}_2^R \ \dots \ \mathbf{S}_N^R \ \mathbf{S}_1^I \ \mathbf{S}_2^I \ \dots \ \mathbf{S}_N^I]^T \quad [2]$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} c_{11} & -d_{11} & \sum_{m=2}^M c'_{m1} & -\sum_{m=2}^M d'_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{1N} & -d_{1N} & \sum_{m=2}^M c'_{mN} & -\sum_{m=2}^M d'_{mN} \\ d_{11} & c_{11} & \sum_{m=2}^M d'_{m1} & \sum_{m=2}^M c'_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{1N} & c_{1N} & \sum_{m=2}^M d'_{mN} & \sum_{m=2}^M c'_{mN} \end{bmatrix} \quad [3]$$

$$\hat{\boldsymbol{\rho}} = [\hat{\rho}_W \ \hat{\rho}_F]^T \quad [4]$$

$$c_{mn} = \cos(2\pi \Delta f_m TE_n) \quad [5]$$

$$d_{mn} = \sin(2\pi \Delta f_m TE_n) \quad [6]$$

$$c'_{mn} = p_m c_{mn} \quad [7]$$

$$d'_{mn} = p_m d_{mn} \quad [8]$$

$$\sum_{m=2}^M p_m = 1 \quad [9]$$

ここに \mathbf{S} : 信号, \mathbf{A} : ヤコビアン行列, $\hat{\boldsymbol{\rho}}$: 成分密度, $\hat{\rho}_W$: 水の成分密度, $\hat{\rho}_F$: 脂肪の成分密度, R : 実部, I : 虚部, M : 成分数, TE_n : n 番目のエコータイム, $\hat{\rho}_m$: m 番目の成分密度, Δf : 基準成分と m 番目成分との周波数差, T は転置行列を表す. p_m : m 番目の脂肪酸成分の信号強度比である. [9]式に示した通り, 脂肪酸成分の信号強度比の合計は 1 であるとした。

(3) 複フリップ角法

上述の修正 IDEAL のアルゴリズムにおいて未知数としていた, 各化学シフト成分のプロトン密度を SPGR の信号応答として与えた. ひとつの化学シフト成分に着目すると応答は次式のように得られた。

$$\rho = M_0 \frac{(1 - E_1) \sin \alpha}{1 - E_1 \cos \alpha} \quad [10]$$

$$E_1 = \exp\left(-\frac{TR}{T_1}\right) \quad [11]$$

ここで ρ : IDEAL 法により求めた, ある成分の密度, M_0 : 熱平衡磁化, α : フリップ角, TR : 繰り返し時間である. 上式よりフリップ角 α によって得られる成分密度値が変化することがわかる. 式[10]の両辺に $\frac{1 - E_1 \cos \alpha}{\sin \alpha}$ を乗じ, 求めたい未知数 T_1 を含む E_1 の項を傾きに持つ, 線形一次関数へ変形すると次式が得られる。

$$\frac{\rho}{\sin \alpha} = E_1 \cdot \frac{\rho}{\tan \alpha} + M_0(1 - E_1) \quad [12]$$

左辺 $\frac{\rho}{\tan \alpha}$ を横軸 x , 右辺 $\frac{\rho}{\sin \alpha}$ を縦軸 y とすると上式は以下のような 1 次式と見なせる。

$$y = a \cdot x + b \quad [13]$$

従って得られたデータ点に一次回帰を行えば, 回帰直線の傾き a より次式より T_1 が得られる。

$$T_1 = -\frac{TR}{\ln a} \quad [14]$$

上述の修正 IDEAL 法によって分離検出された化学シフト成分について, このような T_1 値の導出を行った。

(4) 先験情報を用いた多点 Dixon 法と 2pointDixon 法の比較

提案した信号処理法の妥当性・有用性を検証するため MATLAB (Mathworks, Natick, MA, US) を用いて, 数値ファントムと解析プログ

ラムを作成し、先験情報を用いた多点 Dixon 法と単純な 2-point Dixon 法の T_1 推定値を比較した。

数値ファントムのパラメータは以下の通りとした；画素数， 64×64 ；フリップ角， 10° ， 50° ；設定温度， 37°C ；TR，23 ms；2-point Dixon 法における TE，0.375, 0.751 ms；多点 Dixon 法における TE，0.305, 0.702, 1.053, 1.404, 1.755, 2.106, 2.457 ms；脂肪 9 成分の信号強度比，0.047, 0.023, 0.018, 0.017, 0.064, 0.087, 0.067, 0.596, 0.108；水及び脂肪 9 成分の T_1 ，1200, 466, 476, 258, 233, 250, 264, 245, 305, 545 ms； CH_2 を基準とした脂肪成分 1~7 及び 9 の周波数差，1331.7, 1613.7, 1372.4, 1200.1, 1118.6, 382.3, 363.5, 116.0, 0, -162.9Hz。以上の条件で作成した信号に，乗算合同法で生成した白色・ガウス型雑音を重畳した。雑音の標準偏差は総信号の 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30 % (SN 比 100, 33.3, 20, 14.3, 10, 6.7, 5, 3.3) とした。

(5) 実験による提案法の有用性の検証

以上の検討結果を，総合的に検証するため，小動物用 MRI 装置を使った実験を行った。直径 30mm の試料管にオリーブオイル（キシダ化学）を高さ 40mm まで入れ，9.4T の MRI 装置（AW400WB, Bruker）及びソフトウェア（ParaVision5.0）を使用し SPGR で撮像を行った。撮像条件は以下の通りとした。Spatial matrix, 256×256 ；Flip angle, 10° , 50° ；温度， 22°C ；TR, 10ms；TE, 4.106, 4.45, 4.810, 5.162, 5.514, 5.866, 6.218 ms。得られた画像を提案法と複フリップ角法で処理し， T_1 画像を得た。

4. 研究成果

(1) 脂肪酸のプロトン化学シフト成分の信号強度の温度依存性

11T におけるウシ脂肪の磁気共鳴スペクトルを Fig. 1 に示す。各温度における脂肪酸成分の信号強度比を Fig. 2 に示す。同図に基づいて，各脂肪酸成分の信号強度比の温度に対する相関係数ならびにその有意水準を Table 1 に示す。主要成分である CH_2 は相関係数が -0.177, p 値が 0.430 であり，温度との相関は認められなかった。成分 3 及び 4 を除く全ての成分においても同様の結果であった。成分 3, 4 は温度に対して相関が見られたが，これらの成分は強度が小さいものである。この結果より脂肪酸成分の信号強度比は温度に対して固定しても良いと判断された。この結果に基づいて式[1]~[9]を定式化することが可能であった。

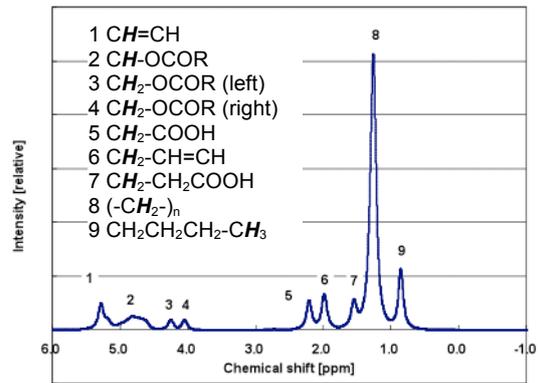


Fig. 1 Bovine fat spectrum at 11T

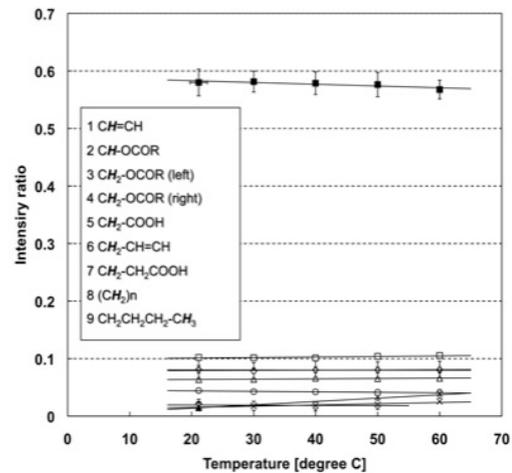


Fig. 2. Correlation between signal intensities and temperature

Table 1. Significant level of each fatty acid components

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	CH=CH	CHO	CH_2O	CH_2O	$\text{O}=\text{C}-\text{CH}_2$	$\text{C}=\text{C}-\text{CH}_2$	$\text{O}=\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2$	CH_2	CH_3
Bovine	-0.659	-0.280	0.945	0.897	0.467	-0.034	-0.109	-0.177	0.463
	($p = 0.113$)	(0.525)	(0.001)*	(0.003)*	(0.129)	(0.183)	(0.188)	(0.430)	(0.322)
Porcine	-0.782	-0.768	0.969	0.817	0.570	-0.440	0.104	0.548	0.124
	(0.014)	(0.053)	(0.006)*	(0.060)	(0.147)	(0.281)	(0.413)	(0.165)	(0.495)

Table 2. Amplitude and T_1 value by 3 components calculation and 10 components calculation

Components	amplitude			T_1		
	H_2O	CH_2	CH_3	H_2O	CH_2	CH_3
Truth	0.1968	0.4105	0.0445	1200	305	545
3-components model	0.1943±0.018	0.407±0.018	0.0442±0.004	1214.3±16.2	308.7±3.1	549.9±5.5
Error [%]	1.3	0.9	0.7	1.2	1.2	0.9
10-components model	0.1969±0.019	0.410±0.018	0.0447±0.004	1199.8±15.9	304.9±2.9	543.1±5.2
Error [%]	0.05	0.05	0.4	0.02	0.03	0.3

(2) T_1 推定精度の比較

単純な 2-point Dixon 法と先験情報に基づく提案法における CH_2 の T_1 推定精度の比較を Fig. 3 に示す。各ノイズレベルに対する T_1 推定値は 2-point Dixon 法では 292.4, 292.4, 293.1, 293.9, 294.3, 298.1, 295.9, 280ms, 提案法では 305.1, 305, 305.4, 305.8, 306.4, 307.4, 309.7, 311.1 ms であり，全てのノイズレベルに対して，提案法の方が真値（305 ms, 図中緑色の実線）に近い値となった。また値のばらつきも提案法の方が総じて小さい結果となった。

両法による T_1 推定系統誤差を改めて Fig. 4

に示す。図から明らかなように系統誤差は提案法の方が 2-point Dixon 法に比べて明らかに小さくなっている。T 検定を行った結果、両法における系統誤差の差異は $p < 0.01$ 以下の水準で有意であった。また提案法では系統誤差がノイズレベルの増大と共に単調に増大したが、2-point Dixon ではノイズレベルが 15% までは系統誤差がやや減少し、そのレベルを越えると再び系統誤差が増大する傾向が見られた。

2-point Dixon 法ではノイズのレベルがある程度大きくなると、 CH_2 以外の成分強度がノイズレベル以下となり、2 成分の成分分離に与える影響が小さくなり T_1 の系統誤差が小さくなったものと考えられる。ただし 20% を越えるノイズレベルでは、 CH_2 の信号強度、したがって T_1 の推定精度が低下していったものと考えられる。これに対して提案法はいずれのノイズレベルにあっても 2-point Dixon 法よりも T_1 の推定精度が高く、先験情報を用いることの有用性が示されたと考えられる。

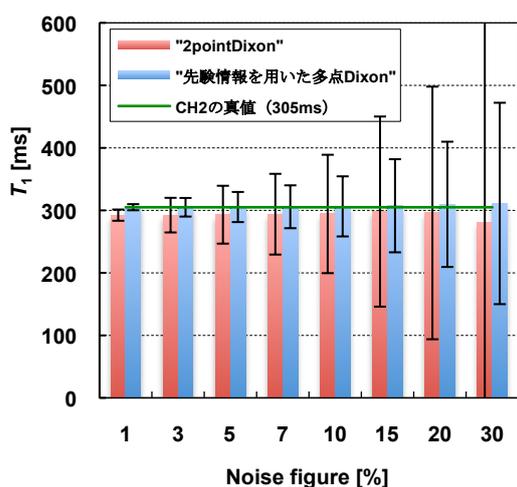


Fig. 3 SN 比を変化させた時の 2pointDixon 法と先験情報を用いた多点 Dixon 法の CH_2 の T_1 推定精度の比較

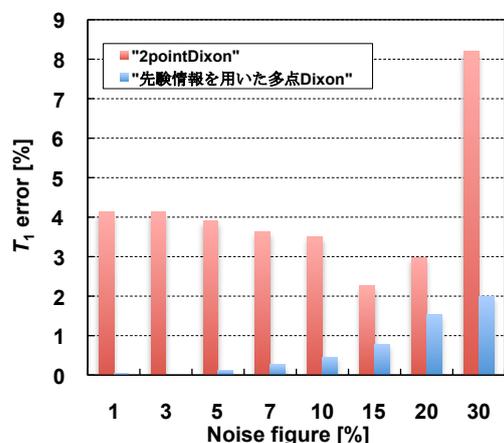


Fig. 4 SN 比を変化させた時の T_1 推定値の系統誤差

(3) 実験による提案法の有用性の検証

オリーブオイルを試料として、提案法により 9.4T MRI における成分分離を試みた結果を Fig. 5 に示す。試料には水がほとんど含まれないため H_2O 画像の信号強度はほぼゼロである。これに対し CH_2 ならびに CH_3 に画像を分離して表示することができた。ただし実験で使用した 9.4T MRI では TE の最小値が 3.5ms で、シミュレーションと同一条件では撮像できないという問題点は残った。

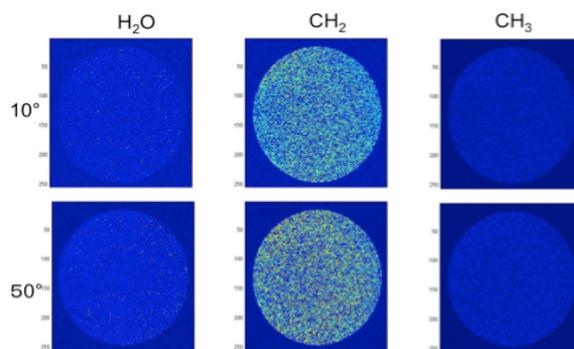


Fig. 5 Amplitude images of H_2O , CH_2 and CH_3

脂肪酸成分の信号強度比が温度に対して不変であることは全く新たな知見であり、これを利用することにより、信号強度比を先験情報とした、 T_1 分布推定のアルゴリズムを提案し、その有用性を示した。この結果は骨転移や乳がんに対する MRI ガイド下 HIFU 治療における温度分布画像化法の精度改善を可能にする知見である。この最終的な知見をまとめた論文は現在投稿準備中であり、6 月中を目処に投稿予定である。

なお本研究は上述の、脂肪酸成分の信号強度比が温度に対して不変であるとの知見を得てやや計画を修正して実施したが、当初計画にあった、ヒト脂肪を構成する数種の脂肪酸（オレイン酸、パルミチン酸など）にブレークダウンした、 T_1 の温度依存性の詳細な検討ならびに帯磁率効果の影響の精査は、継続して実施する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Kuroda K, Morita, Lam M, Obara M, Baron P, Bartels W, Honda M, Horie H, Imai Y. Feasibility of noninvasive temperature imaging of fat based on magnetic resonance relaxation times of lipid proton components. Thermal Medicine 2012;28(4):87-96. (査読有)

(2) Kuroda K, Shirakawa N, Yoshida Y, Tawara K, Kobayashi A, Nakai T. Evaluation of the

magnetic properties of cosmetic contact lenses with a superconducting quantum interference device. *Magn Reson Med Sci* 2014;13(3):207-214 (IF = 1.038). (査読有)

〔学会発表〕(計 10 件)

(1)Kuroda K. Progress in noninvasive MR thermometry. *Thermal Medicine, Proc The 11th International Congress of Hyperthermic Oncology (ICHO) and The 29th Japanese Congress of Thermal Medicine (JCTM)*, Hyatt Regency Kyoto (Kyoto) 2012;28(Suppl):p. 71.

(2)Kuroda K, Morita S, Albarodi K, Obara M, Baron P, Lam M, Bartels W, Honda M, Horie T, Imai Y. Temperature dependence of magnetic resonance signals of lipid proton components and its application to fat thermometry. *Thermal Medicine, Proc The 11th International Congress of Hyperthermic Oncology (ICHO) and The 29th Japanese Congress of Thermal Medicine (JCTM)*, Hyatt Regency Kyoto (Kyoto) 2012;28(Suppl):p. 137.

(3)Kuroda K, Takano Y, Obara M, Baron P, Lam M, Bartels W, Masatoshi H, Imai Y. Proton Density Ratio Consideration in Optimizing Image Processing in Fat-Water Thermometry using Methylene T1 and Water Resonance Frequency. *Proc 20 th Annual Meeting Intl Soc Mag Reson Med, Melbourne (Australia)* 2012;20:1562.

(4) 森田修平, 本田真俊, 小原 真, 堀江朋彦, 今井 裕, 黒田 輝. 磁気共鳴による非侵襲温度分布画像化: メチレン基スピン格子緩和時間による脂肪温度計測手法の最適化. 2013/3/2; 東京厚生年金病院 (東京) .

(5) 熊本悦子, 國領大介, 森田修平, 黒田 輝. MR ガイド下集束超音波治療における非侵襲温度分布モニタリング. 日本ハイパーサーミア学会第 30 回大会, 横浜シンポジウム (横浜) 抄録集, *Thermal Medicine* 2013;29 (Supplement):p. 49.

(6) 森田修平, Lam MK, Bertels W, 今井 裕, 黒田 輝. 脂肪組織プロトン磁気共鳴のスピン格子緩和時間による非侵襲温度分布が増加における信号処理法の検討. 日本ハイパーサーミア学会第 30 回大会, 横浜シンポジウム (横浜) 抄録集, *Thermal Medicine* 2013;29 (Supplement):p. 169.

(7) Morita S, Lam MK, Bartels W, Imai Y, Kuroda K. Signal Processing for Noninvasive Temperature Imaging of Fat using Spin-Lattice relaxation time of Proton Magnetic Resonance. *Proc 6th Asian Congress of Hyperthermic Oncology & 31st Japanese Congress of Thermal Medicine AOSSA (Fukui), Thermal Medicine*

2014; 30(Supplement):p. 85.

(8)Morita S, Obara M, Honda M, Imai Y, Kuroda K. Signal processing for noninvasive temperature imaging of fat and aqueous tissues using methylene T1 and water proton resonance frequency. *Proc 10th Interventional MRI Symposium, Leipzig (Germany)* 2014(P-37): p.126.

(9)黒田 輝. (特別講演) MRIによる集束超音波治療のガイドとモニタ. 第 13 回日本超音波治療研究会, 仙台情報・産業プラザ (仙台) 2014.

(10)森田修平, ラム・ミーキー, バーテルズ・ウィルバート, 今井 裕, 黒田 輝. 脂肪プロトン成分の T1 による温度分布画像化のための信号処理法の検討. 第 42 回日本磁気共鳴医学会大会, ホテルグランビア京都 (京都), 講演抄録集, *日本磁気共鳴医学会雑誌* 2014;34(Supplement):p. 191.

〔図書〕(計 1 件)

(1) Kuroda K. Temperature Monitoring by Chemical Shift-Based Method. *Handbook of in vivo Magnetic Resonance Spectroscopy*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2015. (査読有, 印刷中)

〔受賞〕

(大学院生)

森田修平, Lam MK, Bertels W, 今井 裕, 黒田 輝. 脂肪組織プロトン磁気共鳴のスピン格子緩和時間による非侵襲温度分布が増加における信号処理法の検討. 日本ハイパーサーミア学会第 30 回大会口演賞.

6. 研究組織

(1)研究代表者

黒田 輝 (Kuroda, Kagayaki)
東海大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 70205243

(2)研究分担者

今井 裕 (Imai, Yutaka)
東海大学・医学部・教授
研究者番号: 70138113