

磁性ナノ粒子の磁気緩和とパンケーキ型コイルを用いた誘導加温

青戸知広¹、高橋克希¹、星山弘樹¹、由岡友太¹、山田努¹、
 大多哲史²、池畑芳雄³、山田外史³、竹村泰司¹
 (横浜国立大学¹、静岡大学²、金沢大学³)

Relaxation of magnetic nanoparticles and inductive heating using a pancake-type applicator

T. Aoto¹, K. Takahashi¹, H. Hoshiyama¹, Y. Yoshioka¹, T. Yamada¹,
 S. Ota², Y. Ikehata³, S. Yamada³, Y. Takemura¹

(Yokohama National University¹, Shizuoka University², Kanazawa University³)

はじめに

我々はハイパーサーミア応用に向けた交流ヒステリシス測定や磁気緩和の解明などを行っている¹⁾。今回は、それらに加え、人体サイズで励磁することを目的に設計されたパンケーキ型コイルを用いた加温実験を行った。

実験方法

Figure 1 にパンケーキ型コイル²⁾の概観を示す。人体に交流磁場を印加する仕様として設計・作製されたものであり、コイル外径 360 mm である。リッツ線束 (直径 0.06 mm の素線を 250 本で束ねたもの) を 24 本で紐状に編み、中空で直径約 10 mm としたものを 5 ターン巻いている。コイルの周囲は冷却液 (フッ素系不活性液体) で満たされており、励磁電流は 400 A_{rms} 通電することが可能である。

試料は市販されている磁性流体 (株式会社シグマハイケミカル、M-300、一次粒径 11±3 nm、二次粒径 52±15 nm のマグネタイト Fe₃O₄) を用いた。

本加温実験では試料 135 μl (鉄 50 mg 含有) を Fig.1 下部に示した人体ファントム中でコイルから 90 mm 離れた地点に設置した。パンケーキ型コイルに 185 A_{rms}、周波数 142 kHz の交流電流を通電した。印加磁界強度は 2.48 kA/m である。また純粋な試料の発熱によるものであることを確かめるために、試料を設置せずに同条件で温度上昇を測定した。

実験結果

Figure 2 に測定結果を示す。磁性流体試料は 10 分間で 20℃以上の温度上昇が観測された一方で、試料を設置しなかった場合は温度上昇が観測されなかった。これによりコイルの輻射熱の影響は無いことがわかる。

当日は、人体ファントムを用いた実験や磁気緩和特性の詳細を報告する。

謝辞: 本研究の一部は JSPS 科研費 26289124、及び 15H05764 の助成を受けて実施した。



Fig. 1 Pancake-type applicator and human-body phantom.

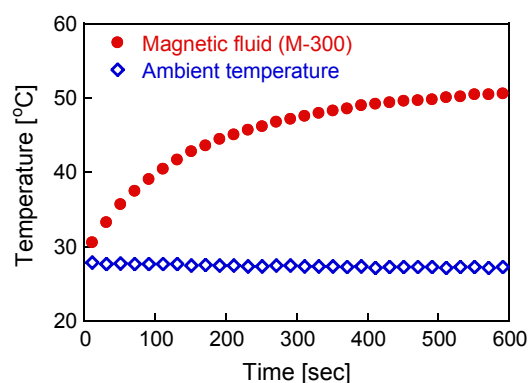


Fig. 2 Temperature rise of magnetic nanoparticles.

参考文献

- 1) 北口了一、大多哲史、山田努、竹村泰司 : “磁性ナノ粒子の磁気緩和特性とその液中濃度・粘度依存”、第 39 回 日本磁気学会学術講演会、09aE-5、名古屋、2015 年。
- 2) 山田外史、池畑芳雄、林亮平、山崎涼平、大田貴司 : “癌温熱療法のためのダブルパンケーキ形コイルシステムの開発”、電気学会マグネティックス研究会、MAG-15-013、金沢、2015 年。

磁性ナノ粒子の形態に依存した磁気緩和機構の評価

大多哲史¹、大橋成美¹、Subbiah Latha²、Chakrapani Prabu²、Palanisamy Selvamani²、竹村泰司³

(¹ 静岡大学、² Anna University、³ 横浜国立大学)

Evaluation in magnetic relaxation of magnetic nanoparticle influenced by its condition

S. Ota¹, N. Ohashi¹, S. Latha², C. Prabu², P. Selvamani², Y. Takemura³

¹Shizuoka University, ²Anna University, ³Yokohama National University

はじめに

磁性ナノ粒子の磁気緩和機構の評価は、がん温熱治療や磁気粒子イメージングへの応用をする上で重要な課題である。本研究では、水中、固体状態、細胞環境の粒子の磁気緩和機構を交流磁化曲線の測定により評価した。また腫瘍内において粒子の磁化が低下により発熱量が低下することは、直流磁化曲線の評価することで明らかになっている¹⁾。

実験方法・結果

コア粒径が 9.8 nm のマグネタイト粒子について最大磁場 4, 8 kA/m、周波数 100-500 kHz の条件で交流磁化測定を行った。水中分散試料(Liquid)、エポキシ樹脂による固体試料(Fixed)に加えて、がん細胞に粒子を添加し、その細胞を剥離・回収した細胞試料(Cellular)を用意し、それぞれについて交流磁化測定を行った。

Fig. 1 に各試料の交流磁化曲線を示す。Liquid においてはネール緩和に加えてブラウン緩和も生じるため Fixed に比べて磁化、保磁力共に大きいことが確認された。また Cellular は Fixed に比べて磁化が小さくなった。これは細胞内において粒子の凝集が生じて、磁気相互作用が大きくなったためと考えられる²⁾。磁気相互作用による磁化の低下は濃度を変化させた水中分散粒子においても確認されている³⁾。Fig. 2 は交流磁化曲線の面積から算出した発熱量(Specific loss power: SLP)の励磁周波数依存性を示している。SLP について、Liquid は Fixed よりも大きく、Cellular は Fixed よりも小さくなった。これらは、Liquid は Fixed よりも磁化が大きく、磁気緩和における位相遅れが大きいこと、Cellular は Fixed よりも磁化が小さく位相遅れが同程度であることにそれぞれ起因する。また機能化させた磁性ナノ粒子などの磁化特性についても当日発表する。

謝辞：

本研究の一部は JSPS 科研費 26289124、及び 15H05764 の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) S. Dutz, M. Kettering, I. Hilger, R. Müller, M. Zeisberger: *Nanotechnol*, **22**, 265102, 2011.
- 2) S. Ota, T. Yamada, Y. Takemura: *Nanomater.*, **2015**, 836761, 2015.
- 3) S. Ota, T. Yamada, Y. Takemura: *J. Appl. Phys*, **117**, 17D713, 2015.

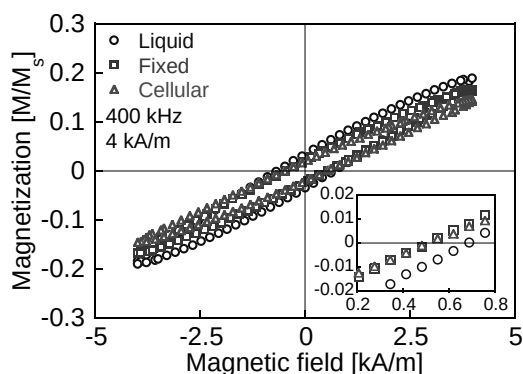


Fig. 1 水中、固体、細胞試料における磁化曲線

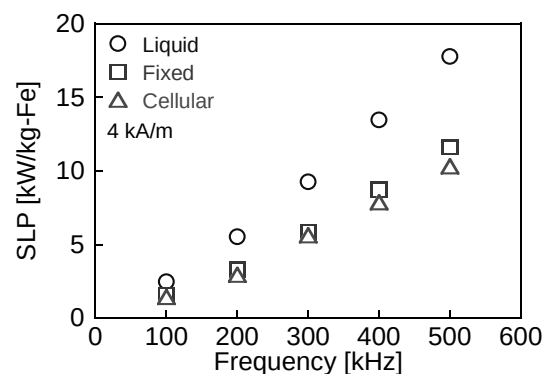


Fig. 2 各試料における SLP の周波数依存性

Single-Sided 磁気粒子イメージング システムの開発

山本 和志*, 笹山 瑛由, 松尾 政晃, 吉田 敬, 圓福 敬二
九州大学システム情報科学府

Development of Single-sided Magnetic Particle Imaging system

Kazushi Yamamoto, Teruyoshi Sasayama, Masaaki Matsuo, Takashi Yoshida, Keiji Enpuku
Kyushu Univ.

1. はじめに

磁気マーカーを体内に注入し、その磁気信号を検出することで癌等の疾病領域を高感度・高分解能に画像化する磁気粒子イメージング (MPI) 技術が医療診断において注目されている。本研究では、センチネルリンパ節生検への応用を想定した MPI システムの開発を行っている。これまでの研究ではサンプルの下側に FFP(Field Free Point) を含む傾斜磁界を作り出す傾斜磁界コイルを配置し、上側にその他システムを配置してイメージングを行っていた。しかし、医療応用を想定すると検査対象である患者の上下にシステムを配置するのは利便性に欠ける。今回、システム全体をサンプル上側に集積した状態で MPI を行う Single-Sided MPI システムを用いて 2 つのサンプルの識別に成功したため、以下に報告する。

2. 磁気粒子イメージング

本システムでは、サンプル (Resovist; 500 μg を直径 6 mm ϕ の容器に入れたもの) に交流励起磁界 1 mT (周波数 10 kHz) とこれに直交する直流傾斜磁界を印加し、サンプルからの第三高調波を検出している。Fig.1 に今回用いたイメージングシステムの写真を示す。磁気ナノ粒子は、交流励起磁界に直流磁界が重畳されたとき、粒子の磁化飽和によりその応答信号は抑制されるという特徴を持つ。このため、直流磁界がゼロとなる点 (FFP) を持つ直流傾斜磁界を用いることで、FFP 上にある粒子からのみ信号を得ることができる。この FFP を含む直流傾斜磁界を作り出すのが Fig.1 に示す傾斜磁界コイルである。

本システムでは、FFP を電氣的に走査する方法を用いてイメージングを行っている。Fig.1 に示す様に FFP の電氣的走査用のシフトコイル (銅線径 1 mm、巻数 88turns) が傾斜磁界コイルの外周に巻いてあり、それぞれに適当な電流を印加することにより、FFP を走査することができる。これによりサンプルを中央に配置したままでイメージングを行うことが可能となった。

今回、リンパ節がイメージング範囲内に複数ある場合を想定し、サンプルを 2 つ配置し、傾斜磁界コイルに 5A、シフトコイルに 9 A_{p-p} の三角波 (周波数 2 Hz) を印加して、32 mm 四方の範囲でイメージングを行った (Fig. 2)。図に示す様に磁界マップにはサンプル位置に対応する二つのピークが観測された。すなわち、二つのサンプルを識別するとともに、このピーク位置からサンプルの場所の特定をすることが出来る。

3. まとめ

Single-Sided 磁気粒子イメージングシステムを開発し、サンプル 2 つのイメージングを行った。傾斜磁界コイルを用いて空間分解能を向上させることで 2 つ配置されたサンプルの識別に成功した。

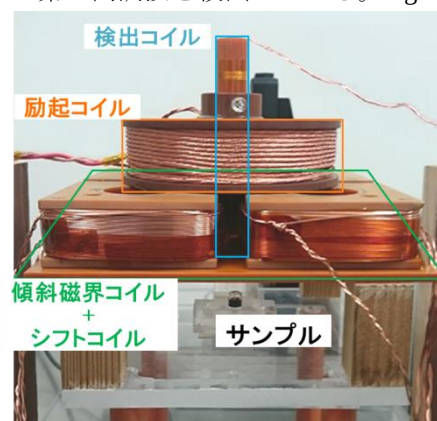


Fig.1. Picture of Single-Sided MPI system

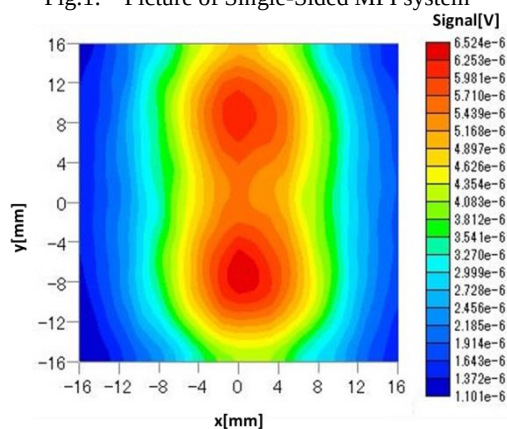


Fig. 2. Contour map of the magnetic field using Single-Sided MPI system. The gradient field is 0.4 T/m.

磁気ナノ粒子の交流磁化特性の磁界強度および周波数依存性

笹山 瑛由、吉田 敬、圓福 敬二
(九州大学)

Intensity and Frequency Dependence of AC Magnetization Characteristics of Magnetic Nanoparticles

Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Keiji Enpuku
(Kyushu University)

1. はじめに

ナノメートルサイズの磁気ナノ粒子を高分子でコーティングし、その表面に検査試薬や薬剤を固定したものは磁気マーカーと呼ばれる。磁気マーカーの交流磁化特性は、ネール緩和およびブラウン緩和などの緩和時間の存在により、磁気粒子イメージング (MPI) の感度や空間分解能に影響を与える。本研究では、磁気マーカー (Resovist、富士フイルム RI ファーマ製) について交流磁界の磁界強度および周波数を変化させながら交流ヒステリシスループの測定を行い、交流磁界の磁界強度および周波数が磁気マーカーの交流磁化特性に及ぼす影響について検討を行った。なお、生体内に磁気マーカーを導入したときにはブラウン運動が抑制されてネール緩和が支配的になると考えられるため、磁気マーカーを固相化して検討を行った。

2. 方法¹⁾

磁気ナノ粒子を励起する交流磁場の生成にはリッツ線 ($\phi 0.1$ mm、600 本) を 64 回巻いたソレノイドコイル (内径 20 mm、長さ 40 mm) を用いた。LC 共振回路により励起し、キャパシタの容量を変化させて共振周波数を変化させた。磁化検出には単線 ($\phi 0.2$ mm) を 9 回巻いた検出コイルを用いた。検出コイルに誘起された電圧をアイソレーションアンプ (エヌエフ回路設計ブロック、5325) で増幅した後、A/D コンバータ (NI、PXIe-5122) にて取得し、その電圧値を積分することで磁化 M を求めた。磁界 H はシャント抵抗 (N4L、HF001) に流れる励磁電流を計測して求めた。

3. 結果

図 1 に 5 mT (rms) および 15 mT (rms) で励起時の交流ヒステリシスループを示す。高周波であるほど交流ヒステリシスループが開いていることから、MPI において走査速度が速いほど検出信号に遅れが生じることを示唆している。

図 2 に 5 mT (rms) および 15 mT (rms) で励起時の検出信号 ($V = -dM/dt$) の高調波スペクトルを示す。励起磁界が低磁界あるいは高周波であるほど高調波信号の減衰が大きくなっている。高調波信号を利用する MPI の場合、図 2 の特性を考慮しながら励起磁界強度および周波数を設定する必要がある。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 (16K18114) の助成により行った。

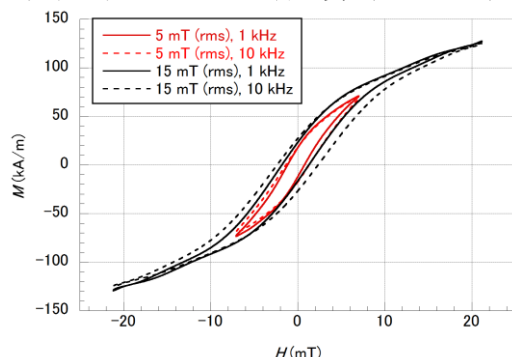


Fig. 1 AC hysteresis loops.

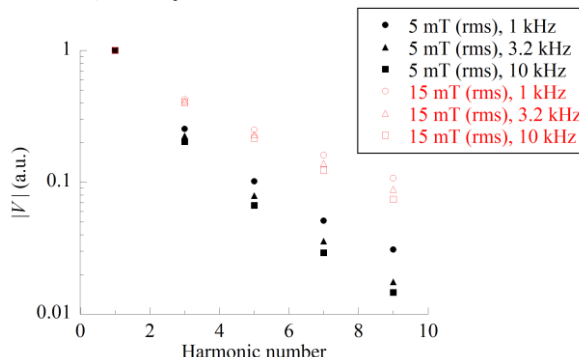


Fig. 2 Harmonic spectrum.

参考文献

- 1) T. Sasayama, T. Yoshida, K. Tanabe, N. Tsujimura, and K. Enpuku, IEEE Trans. Magn. 51, 5101504 (2015)

周波数及び磁界強度に依存した 超常磁性ナノ粒子の磁化ダイナミクス計測

大多哲史¹、竹田遼二²、山田努²、竹村泰司²
(¹静岡大学、²横浜国立大学)

Measurement of magnetization dynamics in superparamagnetic nanoparticle
depended on field frequency and intensity

S. Ota¹, R. Takeda², T. Yamada², Y. Takemura²

¹Shizuoka University, ²Yokohama National University

はじめに

磁性ナノ粒子の磁化ダイナミクスを理解することはがん温熱治療や磁気粒子イメージングといった粒子の医療応用を行う上で必要である。本研究では、特に励磁周波数、磁界強度に依存した超常磁性ナノ粒子の磁化回転を観測した。

実験方法・結果

コア粒径が 5 nm のマグヘマイト粒子（フェルカルボトラン）について最大磁場 2–10 kA/m、周波数 0.2–400 kHz の条件で交流磁化測定を行った。測定は粒子を水中に分散させた液中試料(Liquid)および寒天により固定した固体試料(Fixed)について行った。

Fig. 1 は、各磁界強度における ILP (Intrinsic loss power)の周波数依存性を表している。Liquid において確認されたピークが Fixed には存在しないことから、ブラウン緩和によるピークであると考えられる¹⁾。またピーク周波数が磁界強度の増加に伴い上昇した。これは粒子回転が磁気トルクにより生じているためブラウン緩和時間が磁気トルクの増加に伴い短くなるためと考えられる²⁾。また 0.2 kHz などの低周波では ILP が Liquid よりも Fixed の方が小さい値を示している。この傾向は従来研究でも確認されていて³⁾、本傾向からも超常磁性ナノ粒子の磁化回転に関する知見を示した。さらに Fig. 2 は 1 kHz における Liquid 及び Fixed の磁化と Liquid と Fixed の差を取ることで算出した粒子回転による磁化の増加分についての波形を表している。この見積もりにより粒子回転の位相遅れを算出可能である。本発表では交流磁化測定から見積もった超常磁性ナノ粒子の液中及び固体状態の磁化回転モデルを示す。

謝辞：

本研究の一部は JSPS 科研費 26289124、及び 15H05764 の助成を受けて実施した。

測定に使用した磁性ナノ粒子は、名糖産業株式会社より提供いただきました。ここに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) S. Ota et al. *J. Appl. Phys.*, **117**, 17D713, 2015.
- 2) T. Yoshida and K. Enpuku, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, 127002, 2009.
- 3) R. Hergt et al., *J. Magn. Mater.*, **280**, 358, 2004.

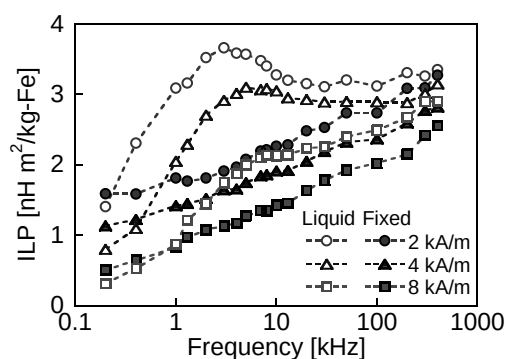


Fig. 1 ILP の励磁周波数及び磁界強度依存性

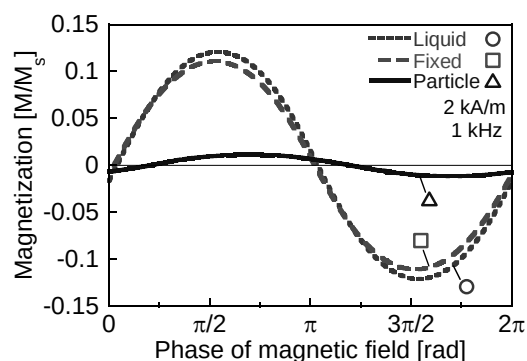


Fig. 2 各試料条件の磁化信号波形