

令和元年6月11日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13666

研究課題名(和文) 交流磁場印加時に磁性流体が発する励磁音響効果に関する研究

研究課題名(英文) Study on sonic wave emission by stimulated magnetic nanoparticles

研究代表者

中川 貴 (NAKAGAWA, Takashi)

大阪大学・工学研究科 招へい教授

研究者番号：70273589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：交流磁場を印加したときに磁性流体から交流磁場の周波数の2倍の周波数の音が発生する励磁音響効果について、磁場の強さ、周波数、磁性流体の物性などをパラメータとして物理的な考察を行った。その結果、励磁音響音の音圧は磁場の強さの二乗に比例することがわかった。励磁音響効果の発生メカニズムは、磁性ナノ粒子と磁場の相互作用と磁場勾配による磁性ナノ粒子の動きであることが物理モデルから明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

交流磁場を印加したときに磁性流体から交流磁場の周波数の2倍の周波数の音が発生する励磁音響効果は、磁場印可から発音までに媒体の伝搬速度より異常な遅れを生じることが分かった。この現象を利用することで、磁性ナノ粒子の位置を特定することができる。このことから、磁気ハイパーサーミア、薬剤輸送、造影剤など様々な医療応用が提唱されている磁性ナノ粒子の生体内での分布を測定することが可能となり、磁性ナノ粒子の生体への適用性を拡張することになった。

研究成果の概要(英文)：Physical examination is performed using the magnetic field strength, frequency, physical properties of magnetic fluid, etc. as parameters for the excitation acoustic effect that generates sound with a frequency twice that of the AC magnetic field frequency from the magnetic fluid when an alternating magnetic field is applied. As a result, it was found that the sound pressure of the excitation sound was proportional to the square of the strength of the magnetic field. It has been clarified from the physical model that the generation mechanism of the excitation acoustic effect is the interaction of magnetic nanoparticles in the magnetic field and the movement of the magnetic nanoparticles by the magnetic field gradient.

研究分野：材料科学

キーワード：磁性ナノ粒子 励磁音響効果 交流磁場 位置検出 音圧 周波数 発音遅延

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2008年に磁性ナノ粒子分散溶液に交流磁場を印加すると励磁周波数の2倍の周波数の音が観測されることが報告された。しかし、この現象は発見されて間もないため、その物理的な背景はほとんど確立されていない。そこで本研究では、この励磁音響効果に関する基礎的な特性を評価することで、背後にある物理を解明する。

2. 研究の目的

磁性ナノ粒子分散溶液に交流磁場を印加すると励磁周波数の2倍の周波数の音が観測される“励磁音響効果”について、音を伝える媒体の弾性率、温度、励磁周波数、磁性ナノ粒子の粒径と濃度などをパラメータとして、この現象の背後の物理を究明する。特に磁場印加に対して励磁音が想定される時間の数十倍以上も遅れて検出される新規な現象にフォーカスし、その原因を探求する。また、この励磁音響効果を応用した磁性微粒子の3次元的位置特定の可能性を視野に入れ、画像化システムの基礎を構築する。

3. 研究の方法

励磁音響効果の基礎物理を追究するために、以下のパラメータを変化させる。

1.マグネタイトナノ粒子の粒径、2.マグネタイトナノ粒子分散溶液の粘度、3.埋め込むポリマーの種類、4.ポリマーを入れる容器の大きさや形状、5.測定温度これらのパラメータを変えることにより、磁場に対する音響応答がどのように変化するかを調査する。これまでの実験では全ての周波数の音を検出してきたが、倍音のピークがシャープに現れることがわかる。この倍音波のみを検出すれば、より詳細な励磁音響波の分析が可能となる。したがって、ロックンアンプを用いて倍音波のみを抽出し解析を行う。ロックンアンプは本申請で調達する。ナノ磁性粒子の代わりにバルクの磁石を埋め込んだ場合には、音の遅れも倍音も観測されなかったことから、励磁音響効果がおこる粒子の大きさには上限があると考えられる。1の実験によりその上限を見極める。励磁音響波の遅れはナノ粒子分散溶液の粘度が大きく関わっていることが考えられる。2の実験により粘度と時間遅れの関係を明らかにする。また、音響プローブまで励磁音響波を伝達する媒体であるポリマーの影響も考慮する必要がある。ポリマーの種類や固さを変えて、励磁音響波の音圧や時間遅れがどのように変化するかを3の実験により考察する。励磁音響波の異常な遅れは、容器壁面による反射波の影響であることも考えられる。4の実験によりポリマーを入れる容器の大きさや形状を変えることにより、応答がどのように変化するかを調査する。特に容器を球状にし、その中心に磁性ナノ粒子を埋め込んだ場合は、壁面までの距離の違いによる音波のたたみ込みの影響を無視することができるので、より本質的な磁場応答を観測できると期待できる。また、励磁音響波の遅れが温度により変化するならば、生体内の温度分布計測の可能性も考えられる。5の実験により測定温度が励磁音響波に与える影響についても考察する。

これらのパラメータを調整することで、励磁音響効果に適した条件を抽出し、それに適した磁性微粒子を合成していく。

4. 研究成果

1. 研究背景

磁性流体に交流磁場を印加すると、音波が誘起される現象“励磁音響効果”が2013年に報告された¹⁾。この励磁音響効果で発生した音波は励磁音響波と名付けられた。励磁音響効果について、いくつかの特徴が報告されている²⁾。励磁音響波の周波数は、印加磁場周波数の2倍になり、またその音圧の強さは磁場強度の2乗に比例することが報告されている。先行研究²⁾では、励磁音響効果の発音機構についての仮説が報告された。

しかし、この仮説の検証は未だに十分にされていない。本研究では、検証を重ねるために、物性を变化させた磁性流体や磁性流体とは異なる磁性材料に交流磁場を印加し、発生した音響波を測定し、それぞれの発音機構について検討した。

2. 実験

2-1 実験系概要

実験試料として、市販の磁性流体 M300 (シグマハイケミカル社製)と市販の鉄板を使用した。

磁性流体は、アガーと混合し、磁性粒子を固定させた。測定容器は厚さ 1mm の PTFE シートに一边 20mm の正方形の穴を空け、ポリイミドテープで底を作製したものを使用した。そこにアガーを混合した磁性流体を充填した後に、ポリイミドテープで蓋をした。この測定試料をコイル中心上に磁性流体が位置するように固定し、コイルに正弦波交流電流を流すことで交流磁場を印加した。鉄板については、一边 20mm, 厚さ 1mm のものを使用し、磁性流体同様にコイル中心に位置するようにし、交流磁場を印加した。発生した励磁音響波をプローブを通じて 110 mm 離れた位置でマイクロフォンによって電気信号として検出し、デジタルオシロスコープによって PC に取り込んだ。実験系の概略を図 1 に示す。

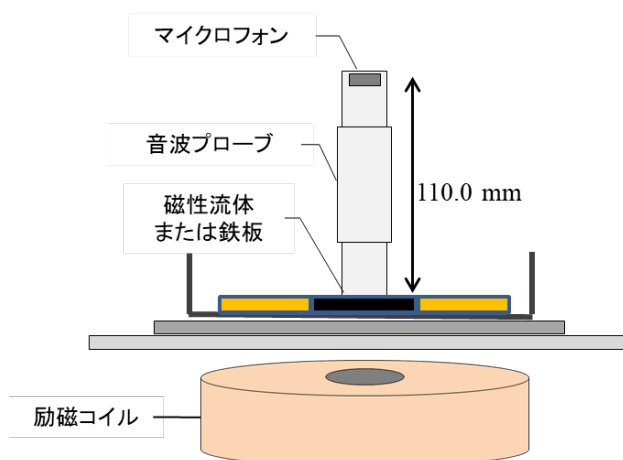


図 1 測定装置概略図

2-2 実験条件

磁場周波数と磁場強度を变化させた連続正弦波の交流磁場を試料に印加し、励磁音響波の測定を行った。磁場周波数は 150, 300, 500 Hz と变化させた。磁場強度に関しては、8.5, 16.6, 24.5, 34.5, 42.6 Oe で变化させた。

3. 実験結果

M300 とアガーの混合液の実験結果を図 2 に示した。M300 とアガーの混合液から交流磁場周波数の 2 倍の周波数を持つ音波が発生し、その音波の音圧が磁場強度の 2 乗に比例した。

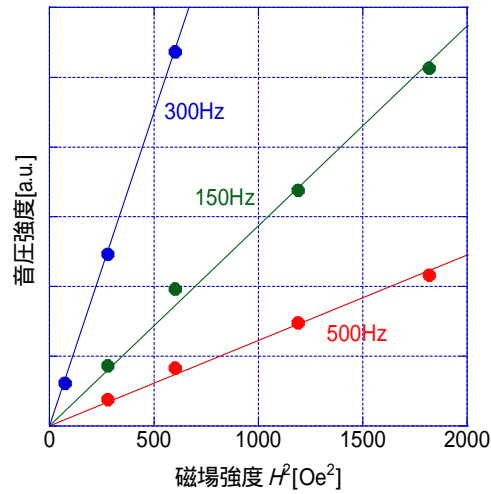


図 2 アガーに閉じ込めた M300 の音圧の磁場強度依存性

鉄板の実験結果は図 3 に示した．鉄板も M300 とアガーの混合液と同様に、磁場周波数の 2 倍の周波数を持つ音波が発生し、その音波の音圧は磁場強度の 2 乗に比例した．

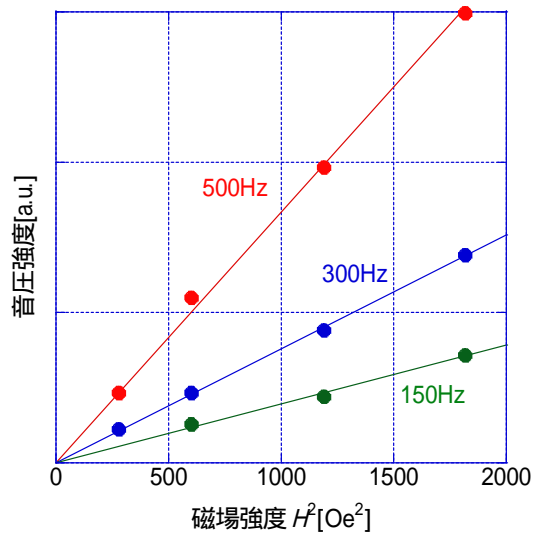


図 3 鉄板の音圧の磁場強度依存性

4. 考察

磁性流体をアガーで固めたものと鉄板においても先行研究^{1,2)}と同じように磁場周波数の 2 倍の周波数の音波が測定された．

ここで磁性ナノ粒子間にかかる磁気力を考える．周波数 $f (= \omega/2\pi)$ の交流磁場 H の振幅 H_0 が小さいとき交流磁場に置かれた磁性ナノ粒子の磁気モーメント M は磁化率 χ に比例する．

$$M = \chi H = \chi H_0 \sin \omega t \quad [1]$$

この磁性ナノ粒子が距離 r_i 離れた磁気モーメント M_i を有する別の磁性ナノ粒子から受ける磁気力 F_i は

$$F_i = \frac{\alpha_i M M_i}{4\pi\mu_0 r_i^4} \quad [2]$$

である．ここで α_i は M_i の向きに依存する定数である．したがって、磁性流体に含まれるすべての磁性ナノ粒子から受ける力 F は下式となる．

$$F = \sum_i F_i = M \sum_i \frac{\alpha_i M_i}{4\pi\mu_0 r_i^4} \quad [3]$$

$M_i = \chi_i H = \chi_i H_0 \sin\omega t$ より

$$\begin{aligned} F &= \frac{\chi H_0^2 \sin^2 \omega t}{4\pi\mu_0} \sum_i \frac{\alpha_i \chi_i}{r_i^4} \\ &= \frac{\chi H_0^2 (1 + \cos 2\omega t)}{8\pi\mu_0} \sum_i \frac{\alpha_i \chi_i}{r_i^4} \end{aligned} \quad [4]$$

となり、磁場振幅の2乗に比例し、周波数の2倍の周波数の音が観測される。

次に磁性体が磁場勾配により受ける力 F を考える磁気モーメント M を有する磁性体が磁場勾配 $\frac{dH}{dz}$ 中に置かれたときに受ける力 F は

$$F = -\frac{dH}{dz} \cdot M \quad [5]$$

N ターンで電流 $I (= I_0 \sin\omega t)$ が流れている半径 r 、コイル長 L のソレノイドコイルを想定すると、コイル端面の中心を原点とし、中心軸上の原点から距離 z 離れた点での磁場の強さ H は

$$H = \frac{NI}{2} \left(\frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + r^2}} - \frac{z}{\sqrt{(z+L)^2}} \right) = \frac{NI_0 \sin\omega t}{2} g(z) = H_0 \sin\omega t \quad [6]$$

である。したがって、この位置に磁気モーメント M の磁性体を置くと

$$\begin{aligned} F &= -\frac{dH}{dz} \cdot M \\ &= -\frac{NIM}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + r^2}} - \frac{z}{\sqrt{(z+L)^2}} \right) \end{aligned} \quad [7]$$

の力を受ける。磁場が弱い場合、磁化 M は磁化率に比例するため

$$M = \chi H_0 \sin\omega t \quad [8]$$

となり、

$$F = -\frac{\chi H_0^2 \sin^2 \omega t}{g(z)} \frac{d}{dz} g(z) = -\frac{\chi H_0^2 (1 + \cos 2\omega t)}{2g(z)} \frac{d}{dz} g(z) \quad [9]$$

となる。ここから、磁場の強さの2乗に比例し、2倍の周波数の音が出る。

M300 とアガーの混合液は粒子間の磁気力と磁場勾配による磁気力の両方が発生していると考えられる。また鉄板の場合は、磁場勾配による力のみが発生していると考えられる。

5. 参考文献

- 1) Tano M, Nakagawa T, Ueda T, Seino S, T.A. Yamamoto, Mater. Lett. 98 (2013) 51-54.
- 2) 石田巖 2015年度 磁性流体連合講演会予稿集

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 5件)

日本ハイパーサーミア学会 第33回大会(2016年9月1~3日 於つくば国際会議場)
招待講演 「磁性ナノ粒子を用いたがんの温熱治療：その周辺技術の開発状況」
中川貴、清野智史、山本孝夫
第3回 IEEE 関西四国磁性研究会(2017年6月24日@大阪府大)

磁性流体の粘性が励磁音響波に与える影響

浅井隆久、中川貴、山本孝夫、清野智史

平成 29 年度 磁性流体連合講演会(平成 29 年 11 月 16～17 日 首都大学秋葉原サテライト
キャンパス)

磁性流体の物性が励磁音響効果に与える影響

浅井隆久、中川貴、清野智史、山本孝夫

第 4 回 IEEE 関西四国磁性研究会(平成 30 年 12 月 15 日 愛媛大学)

磁性流体の励磁音響効果の発音遅延時間の研究

浅井隆久、中川貴、藤枝俊、清野智史、山本孝夫

平成 31 年電気学会全国大会(平成 31 年 3 月 12～14 日 北海道科学大学)

招待講演：交流磁場中の磁性ナノ粒子の挙動とハイパーサーミアへの応用

中川貴

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：清野智史

ローマ字氏名：SEINO Satoshi

所属研究機関名：大阪大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：90432517

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。