

# 生体ファントムを用いた磁気微粒子イメージングの基礎的検討

西口 茜 (光計測工学研究室)  
(指導教員 田上 周路 准教授)

## 1. はじめに

近年、がんの早期発見および低侵襲な診断技術への需要が高まっており、磁気ナノ粒子 (Magnetic Nano Particles, MNPs) を用いた磁性粒子イメージング (Magnetic Particle Imaging, MPI) が新たな診断手法として注目されている。MPI は、磁気ナノ粒子の磁化応答に由来する磁気信号を直接検出する手法であり、生体組織からの背景信号がほとんど存在しないため、高コントラストかつ定量的なイメージングが可能である。一方で、生体内で発生する磁気信号は極めて微弱であり、安全性を確保した磁場条件下で高感度に検出する磁気センサ技術が不可欠である。

本研究では、高感度磁気センサとして光ポンピング磁界センサ (Optically Pumped Magnetometer, OPM) に着目した。OPM は室温近傍で動作可能であることから、生体応用への展開が期待されている。本研究は、OPM を用いた磁気ナノ粒子検出において、生体内に生じる渦電流が励起磁場及び磁気信号に及ぼす影響について検討した。電流の有無が励起磁場および磁気信号の減衰に及ぼす影響に加えて、磁気ナノ粒子の深さによる磁気信号の減衰特性を評価するため、生体と同じ導電率となるように作製した寒天に、磁気ナノ粒子を含んだ寒天を埋め込んだ生体ファントムを作製した。本研究では磁気ナノ粒子としてリゾビストを用いた。実験を進めるにあたり、印加する交流磁場は国際非電離放射線防護委員会 (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) が発行しているガイドライン[1]に示されている基準値以下に設定した。

## 2. 磁界分布計測

光ポンピング磁界センサにはセシウム原子を用い、D2 遷移 (852 nm) に共鳴するレーザー光によって光ポンピングを行った。これによりセシウム原子のスピンの偏極状態を形成し、外部磁場の印加によって生じる磁気共鳴に伴うスピンの偏極状態の変調を、透過光の強度変調として検出することで磁界計測を行った。生体ファントムを用いた磁気信号測定の様子を図 1 に示す。

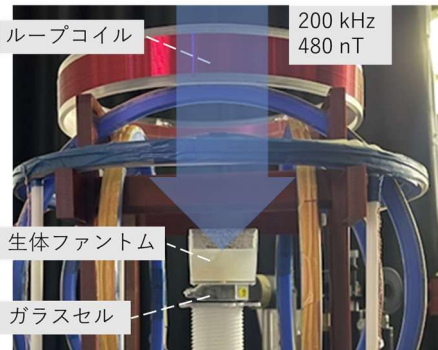


図 1 磁気信号の測定実験系

磁気ナノ粒子は外部から励起磁場を印加することで磁化され、その磁化変化に応じた微弱な磁気信号を発生する。本研究ではまず、励起磁場振幅と磁気信号強度の関係を評価した。

さらに、生体を模擬した寒天ファントム中に磁気ナノ粒子を配置し、周囲媒体として精製水および生理食塩水を用いた比較実験を行った。

## 3. 測定結果

測定結果を図 2 に示す。磁気信号の伝搬損失評価では、励起磁場強度 0.48  $\mu\text{T}$  で測定を行った。表皮効果により励起磁場の減衰が生じると考えられるが、その減衰は検出磁気信号強度にほとんど影響を及ぼさないことが確認された。

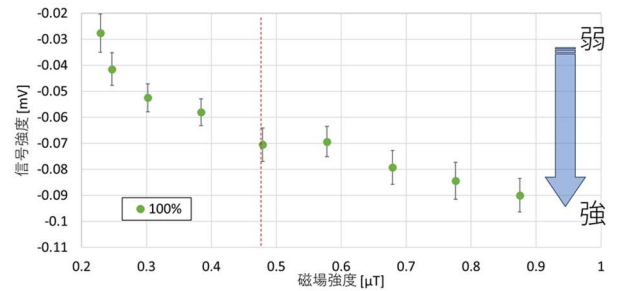


図 2 励起磁場強度と磁気信号強度

次に、磁気ナノ粒子の配置深さを変化させた場合の磁界分布イメージングを行い、深さに応じた磁気信号強度の変化を確認した。測定した磁界分布画像の直交成分を図 3 に示す。

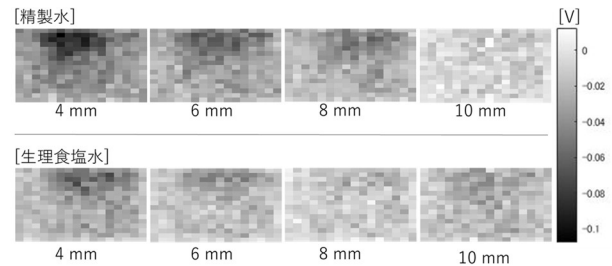


図 3 磁界分布画像(直交成分)

深さの増加に伴い信号強度が低下する傾向が確認された。また、生理食塩水で作製したファントムは精製水の場合より信号強度が低い傾向を示した。これは、生理食塩水中に誘起された渦電流によりジュール熱が発生し、電磁エネルギーの一部が熱として消費されたためであると考えられる。渦電流が測定条件によっては逆転する場合もあり、測定系の安定化とセンサ感度の向上が課題である。深さ依存の減衰が確認できたことから、磁気ナノ粒子の位置推定の可能性が示された。

## 4. まとめ

生体内に流れる渦電流が磁気ナノ粒子の磁気信号に与える影響について理論的および実験的に検討した。その結果、表皮効果による励起磁場の減衰は検出磁気信号強度にほとんど影響を及ぼさず、信号強度の変化には主に生体内における磁気信号の伝搬損失が関与していることが示された。これにより、本手法による深さ推定および腫瘍位置推定への応用可能性が示された。

今後はセンサの安定化を図り、再現性・定量性の高い測定系の構築を目指す。

## 参考文献

[1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)," Health Phys, vol.118, no.5, pp.483-524, 2020.