光ポンピング磁界センサを用いた
磁気ナノ粒子からの信号取得における基礎的検討

Study on signal acquisition from magnetic nanoparticles using an optically pumped magnetometer

1250080　左藤 颯太（光計測工学研究室）
（指導教員　田上 周路 准教授）

1. はじめに

現在医療分野で，磁性粒子イメージング（MPI）を用いてがん組織の低侵襲での位置の推定，早期発見が期待されている．磁気ナノ粒子の粒子表面に機能性分子を修飾した状態で，体内の血液中に注入する．機能性分子によりがん組織に結合することができ，がん組織に集積する．この状態で体外から励起磁場を印加することで，体内の磁気ナノ粒子は磁化し，その磁化応答を計測することで位置の推定が可能となる．

従来の MPI はコイルセンサを用いたものとなっており，磁気検出を行う際，強い励起磁場と直流傾斜磁場を用いる．これにより空間磁界の制御，磁界のイメージングを可能としている[1]．今回のようながん組織の位置推定に応用しようとすると，がん組織に結合した状態だと磁気信号が微弱でありこれまで以上に励起磁場を強くする必要がある．励起磁場を強くし過ぎると身体に対して悪影響を及ぼす可能性がある．これに対して，本研究で用いる光ポンピング磁界センサで身体に対して安全に磁気信号の検出を目指す．光ポンピング磁界センサの励起磁場は，国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）のガイドラインの基準値以下で測定を行う[2]．

磁気ナノ粒子は基本的に液相であり，MPI の研究でも液相の状態での検出が多く行われている．実際にがん組織に磁気ナノ粒子が結合した状態では，磁気ナノ粒子は固相に近いと考えられている[3]．よって，本実験では磁気ナノ粒子を固相状態での磁気検出，液相と固相での磁気信号の強度比較を行う．

2. 磁気信号測定

2.1 磁気ナノ粒子の磁化応答

磁気ナノ粒子は励起磁場によって磁化し，その磁気モーメントは励起磁場に遅れて応答する．この遅れを緩和という．この緩和は，粒子内で磁気モーメントが回転するネール緩和と，粒子自体が回転することで磁気モーメントも回転するブラウン緩和がある．液相では両方の緩和が適用され，固相では粒子が固定されるのでネール緩和が支配的となる．よって，液相の方が励起磁場に対する緩和時間が短いことがわかる．

2.2 光ポンピング磁界センサ

光ポンピング磁界センサでは，磁気ナノ粒子の励起磁場に対する位相遅れを磁気信号として検出する．アルカリ金属原子であるセシウム原子を光ポンピングさせることで，スピン偏極を起こす．このスピンの状態を観測することで，周囲の磁場の測定が可能となる．

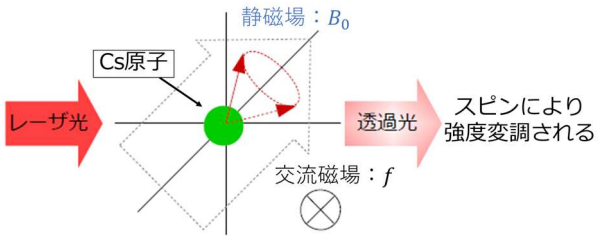

図 1．光ポンピング磁界センサの測定イメージ図

3. 実験内容

光ポンピングさせるためのレーザ光源は分布帰還型（Distributed feedback，DFB）レーザを使用し，円偏光に偏光しセシウム原子に照射する．静磁場は三軸ヘルムホルツコイル，交流磁場（励起磁場）はループコイルを用いて印加した．透過光を PD（Photo Detector）で受光，LIA（Lock-In Amplifier）で信号の分離を行う．光ポンピング磁界センサは励起磁場と磁気ナノ粒子からの信号磁界を測定ができ，LIA より同相成分を励起磁場，直交成分を信号磁界として分離する．

磁気ナノ粒子は医療医薬品「リゾビスト」を使用し，測定対象として「純水」，「石膏」，「液相」，「固相」を用意する．「純水」では純水を 140 μL，「石膏」では純水 100 μL，石膏（硫酸カルシウム二水和物）140 mg，「液相」ではリゾビスト 100 μL，純水 140 μL，「固相」ではリゾビスト 100 μL，石膏 140 mg をプラスチック容器に封入し，液相と固相のリゾビストは約 40%と同等にしている．センサの上に測定対象を設置し，励起磁場の周波数を変え測定を行った．

4. 実験結果

励起磁場の周波数を 70 kHz から 250 kHz で 20 kHz ごとに直交成分の出力電圧を測定した．結果を図 2 に示す．

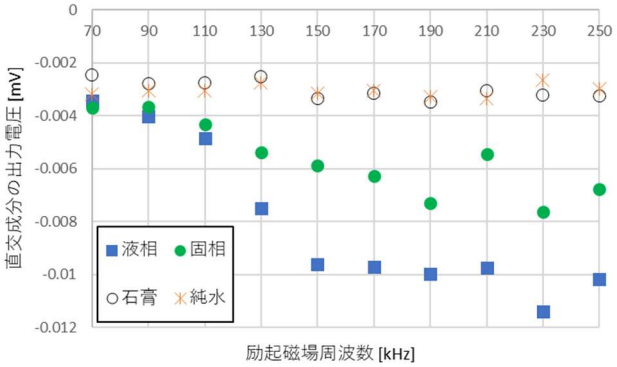

図 2．励起磁場周波数に対する直交成分の出力電圧

図 2 では 130 kHz 以降で測定対象の違いにより，明確な信号強度の変化が見られた．純水に対して固相と液相の直交成分が負の値として出力されていることがわかる．磁気ナノ粒子の緩和による位相差が出力されていると考えられ，固相に比べ緩和時間が短い液相の方がより信号として強く検出されている．

5. まとめ

光ポンピング磁界センサを用いて，磁気ナノ粒子の液相と固相の磁化応答に基づいた磁気信号の検出をすることができた．励起磁場の周波数による強度の違いを利用することで，体外からでも磁気ナノ粒子の状態を確認することができる可能性があり，これによってがん組織の早期発見につながると考える．

参考文献

[1] B. Gleich and J. Weizenecker, “Tomographic imaging using the nonlinear response of magnetic particle, ”June 2005.
[2] ICNIRP, “ Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz), ” May 2020.
[3] D.Soukup, S.Moise, et al., “In Situ Measurement of Magnetization Relaxation of Internalized Nanoparticles in Live Cells, ” 2015.