

磁性ナノ粒子の非線形非平衡磁気応答と がんイメージングにおけるアーティファクト

間宮広明, バラチャンドラン ジャヤデワン*

(物材機構, *滋賀県立大学)

Non-equilibrium and non-linear magnetic response of magnetic nanoparticles
and artifacts in magnetic particle imaging

H. Mamiya and B. Jeyadevan*

(NIMS, *The University of Shiga Prefecture)

準備困難で非常に高価なトレーサーである陽電子放出放射性物質と同様、体内には存在しない磁性粒子の、人体を容易に透過する磁気応答を用い、がんを電磁誘導検出によって簡便にイメージしようとする研究に注目が集まっている。この磁性粒子イメージング(MPI)と呼ばれる検査法では、最近著しく発達した生体内分子輸送システムを利用して磁性ナノ粒子をがん事前に集積させた後、体外から大振幅の交流磁場を印加する。このとき、磁性ナノ粒子の有無に関わらず得られる基本波の応答とは異なり、高調波の信号は磁性ナノ粒子を取り込んだ腫瘍部分からのみ発せられる。また、静磁場によって磁化を飽和させると、この高調波は消えるので、意図的に零磁場スポットを作り出しそれを操作すれば、がんのイメージングが可能となる。MPIは、こうした特質を利用した検査法である。

実用に強く結びついたこのMPI研究では、磁性ナノ粒子は単純に(磁氣的にも)丸いと仮定され、異方性障壁のない応答は超常磁性でLangevin関数で記述されるとしてイメージが構成されてきた。しかし、現実のナノ粒子には磁気異方性は必ず存在し、この場合、これによる超常磁性ゆらぎの抑制が問題となるはずである。また、異方的、すなわち磁化容易軸の向きが存在するなら、粒子自身の回転を無視できない。そこで、我々は、磁性粒子の大振幅の交流磁場応答を数値計算し、これまで無視されてきた丸くない事実のMPIへの影響を明らかとすることを試みた。

数値計算は、今後、感度向上を目指して利用が進むと考えられる10 nmから20 nmの磁鉄鉱ナノ粒子を対象とした。まず、磁化容易軸の配向をランダムとおき、この大きさでは磁気モーメントの向きが磁化容易軸に束縛されている仮定して、軸に平行な2状態間の熱活性型の遷移として交流磁場応答を数値計算した。また、回転に関しては、特に、零磁場スポットの操作に対する超常磁性ナノ粒子交流磁場応答の変化に注目し、様々な粘度の環境下でのシミュレーションを行った。なお、腫瘍中に想定される粒子密度を考慮して、粒子間の相互作用は無視した。

磁性ナノ粒子の磁気応答の3次高調波成分は、粒径を10 nmから増していくと飛躍的に正に増大する。その後、15 nm程度で最大値をとり急減、負となる。これは、異方性障壁の影響で応答が遅れ磁化曲線にヒステリシスが生じたことに由来する。また、交流磁場振幅が大きいかほどゼーマンエネルギーによる異方性障壁の低減効果が大きいため、一定の大きさの粒子では低磁場振幅で信号が負、高磁場振幅で正となる。通常、体表付近に比べて深部で磁場はかなり減衰するため、この結果は、感度向上を目指して大きな粒子を用いた場合、検査深度によって信号の位相反転が起きることを示している。

一方、回転に関しては、異方性を有する磁性ナノ粒子の応答が超常磁性であってもLangevin関数で記述されず、磁化容易軸の向きに依存することの影響が大きかった。すなわち、零磁場スポットに当たる以前の静磁場中で飽和した状態では磁化容易軸も配向しているので、磁場を消磁しても配向がランダムになるまでの間、磁気応答の3次高調波成分は、以前にかかっていた静磁場の向きに大きく依存する。最近の細胞内構造にアンカーされたナノ粒子でもゆっくりと回転するとの報告と考え合わせれば、この結果は、診療時間短縮を目指して零磁場スポットを高速で操作した場合、信号に操作履歴依存性が現れることを示している。

以上のように、磁性ナノ粒子は実際には(磁氣的に)丸くないとしてシミュレーションを行うと、これまで考慮されてこなかったような挙動がみられた。逆に、従来のように安易にLangevin関数だと仮定してイメージを構成すれば、思わぬアーティファクトが生じる可能性があることがわかった。