

論文の内容の要旨

論文題目 中性浮力化磁気駆動マイクロマシンの3D作製手法と3D駆動制御の研究

氏名 安井 真人

磁場は人体に影響することなく通り抜けるため、磁場で駆動する磁気駆動マイクロマシンは低侵襲手術への応用が期待されており、世界中で研究が進められている。磁気駆動マイクロマシンには主に2種類に分類される。一つ目は体積力を利用する方法で、磁石同士が引き合うことを利用する。二つ目は、トルクを利用する方法で、磁気駆動マイクロマシンを磁場で回転させ制御する方法である。スクリー型の磁性体に回転磁場をかけると、回転し液中を進むことができる。スケール効果の観点から見ると、前者はサブミリを超える比較的大きいサイズで、後者は幅広いサイズで有効である。

手術で利用するような磁気駆動マイクロマシンのサイズは、発生力の観点から数ミリからサブミリが望ましい。しかし、このサイズになると重力の影響が強く効き、磁気駆動マイクロマシンの駆動を阻害する。このこともあり、磁気駆動マイクロマシンの3次元駆動の研究はあまり進んでいなかった。サブミリ以上の体積力を利用した方法で、3次元制御が成功しているが、強い磁場が必要となり移動速度も遅い。スクリー型の磁気駆動マイクロマシンでは、サブミリ以上のものを3次元はおろか2次元的に制御することはできていない。上記のように重力の問題は、磁気駆動マイクロマシンの医療への応用を阻害している。そこで、本研究では重力の問題を解決し、スクリー型磁気駆動

マイクロマシンを3次元的に制御すること目標に研究を行った。

本研究では磁気駆動マイクロマシンをマイクロ光造形法により作製する。図1に示すように、マイクロ光造形法では、光硬化樹脂に紫外レーザーを走査して二次元構造物

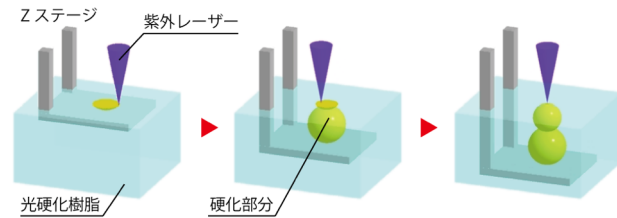


図1 マイクロ光造形法の手順

を作り、構造物を積み重ねることで3次元マイクロ構造物を作る。

重力の影響をなくすために、材料の比重を下げることを目指した。そのために、磁気駆動マイクロマシンの材料である光硬化樹脂に、磁性微粒子と中空マイクロカプセルを混ぜた。磁性微粒子は磁気駆動マイクロマシンに磁性を付加するために加えている。中空マイクロカプセルは気体をポリマーで囲んだ形状をしており、比重が低い。この特性を利用し、中空マイクロカプセルを加えることで軽量化をはかった。この方法はうまくいき、中空マイクロカプセルの濃度をあげると樹脂の比重も低下していき、中性浮力を実現した磁性光硬化樹脂の開発に成功した。

光硬化樹脂に磁性微粒子や中空マイクロカプセルを混ぜると、光硬化樹脂の光硬化特性が変化してしまう。微粒子による光硬化特性の変化を予測する簡便な理論はない。そこで、磁性微粒子や中空マイクロカプセルが光硬化特性に与える影響に関する数理モデルを構築した。そして、磁性微粒子や中空マイクロカプセルの濃度を変えて、光硬化特性を計測し、モデルの有効性をしめした。我々が構築したモデルをより、微粒子の粒子径は大きくし、横方向の散乱を抑えると硬化特性がよくなることがわかった。近年、光硬化樹脂に微粒子を混ぜることによる、樹脂の機能化研究がすすんでいる。本モデルは

磁性微粒子や中空マイクロカプセル以外にも適用できる一般論のため、微粒子を混ぜる光硬化樹脂の開発に役立つだろう。

開発した中性浮力化した磁性光硬化樹脂を用いて、スクリー型磁気駆動マイクロマシンの3次元制御をおこなった。幅0.3mm、長さ2mmのスクリー型の構造物をマイクロ光造形法により造形した。そして、半径方向に着磁し、2cm角の水槽に入れて回転磁場をかけた。回転磁場をかけた結果、重力の影響をうけずに3次元的に駆動することがわかった。また、回転磁場の方向や周波数を変えることで、磁気駆動マイクロマシンの進行方向や速度を制御することもできた。鉛直方向と水平方向の速度を比較すると大差はないことから、作製した磁気駆動マイクロマシンが中性浮力化されていることが示された。

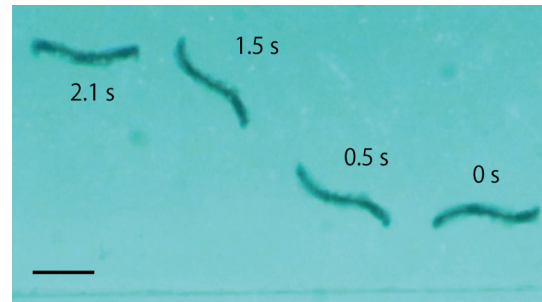


図2 磁気駆動マイクロマシンの3次元制御
数字は時刻(秒)を示す。下方向が重力の方向である。

磁気駆動マイクロマシンを細胞サイズに小型化すれば、細胞のマニピレーションに応用できる可能性がある。そこで、磁気駆動マイクロマシンの小型化を研究した。小型化のために、2光子マイクロ光造形法の応用を考えた。しかし、磁性微粒子に2光子マイクロ光造形の強いパルスレーザーがあたると熱による気泡が生じて造形することができなかった。そこで、磁性光硬化樹脂と1光子マイクロ光造形法により磁性構造体をつくり、その磁性構造体に2光子マイクロ光造形法によりスクリー部分を造形する方法を開発した。この手法に10 μ m程度の磁気駆動マイクロマシンの造形に成功した。そして、外部磁場を与えることにより、水中で2次元制御することも実現した。

本研究により、3次元駆動で問題となる重力の影響を解決した。また、磁気駆動マイクロマシンの小型化への足がかりをつくった。今後は課題としては、磁気駆動マイクロマシンを実際の問題に応用することであろう。体積力を利用したマイクロマシンでは、実際にモノを操作することが求められる。その際、1つのマイクロマシンではモノをつかめないので、複数個のマイクロマシンを独立制御する必要がでてくる。一方、トルクを利用した鞭毛型のマイクロマシンでは、回転するためモノをつかむのは難しい。しかし、移動速度は速いのでモノを送ることでの応用が期待できる。運べる量は少ないので、多数の磁気駆動マイクロマシンが行き来しながらモノの流れを作るシステムが必要となるだろう。