

強磁場による弱磁性粒子の組織制御法に関する研究

物質系専攻 66131 田中 良

指導教員：和田 仁（教授）

キーワード：強磁場、弱磁性粒子、二次元三角格子、構造制御、材料作成プロセス

【背景】

近年、10 T を超える強磁場環境が普及したことで、弱磁性物質(反磁性・常磁性の物質)を対象とした研究が盛んに行なわれるようになった。この結果、弱磁性物質自身やそれらの関与するプロセスへの磁場の影響が理解されるようになってきた。磁場は物質に接触することなく、物質内部へも影響することから、材料作製プロセスのあたらしい制御手法としての利用が期待されている。本研究では、弱磁性物質の多粒子系において、粒子間の相互作用を利用した自己組織的な構造制御に関して着目した。

【弱磁性粒子を用いた二次元三角格子構造形成】

多数の弱磁性粒子が2次元空間に存在する系を超伝導磁石の磁場中に導入すると、条件を整えることで、自己組織的に構造形成する現象が知られている。これは、弱磁性物質といえども、強磁場によってわずかに磁化され、粒子間に相互作用が働くためである。この構造形成は、磁気力と誘起磁気双極子間相互作用による力とのつりあいにより起こる。磁気力は、印加磁場による面内の磁場分布に起因して粒子に作用するもので、面内の1点に集まる力として作用し、式(1)により記述される。また、誘起磁気双極子間相互作用は、式(2)により記述され、面内で粒子間の反発力となる。

$$F = \frac{\Delta\chi}{\mu_0} VB \text{grad } B \quad (1) \quad F = \frac{3\mu_0 m_1 m_2}{4\pi r^4} \quad \text{ただし } m = \frac{\Delta\chi}{\mu_0} VB \quad (2)$$

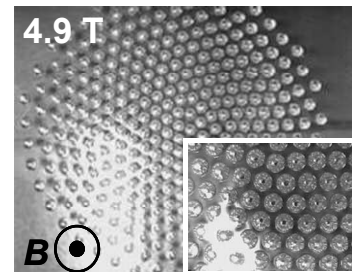


図1: 強磁場下での金粒子(直径1 mm)による二次元三角格子構造

ここで、 B は磁束密度、 $\Delta\chi$ は弱磁性粒子の体積磁化率と溶液等の周囲媒体の体積磁化率の差、 μ_0 は真空透磁率、 V は粒子の体積、 r は粒子間の距離、 m_1, m_2 はそれぞれ相互作用を考慮する2粒子の磁気モーメントである。図1は、直径1 mmの金粒子を40wt%塩化マンガン水溶液中に分散させたときに観測された自己組織的三角格子構造の形成例である。

この現象は、物質が有する磁性に起因するため、これを利用すれば、様々な材料の広範な大きさの粒子を対象として構造形成が可能となると考えられ、規則配列構造を有する材料の作製プロセスへの応用が期待されている。

【研究の目的】

本研究では、誘起磁気双極子間相互作用による弱磁性物質の組織制御の実用化に向けた知見の集積を目的とした。弱磁性粒子を用いた二次元三角格子構造形成は、規則配列を有する材料の作製プロセスへの応用が期待されているが、多様な材料の作製に求められる組織制御の手法は十分に検討されていない。そこで本研究では、材料作製プロセス応用の実現に向け、格子間隔の自在な制御手法に関する検討を行なった。

格子間隔の制御手法としては、 $V, \Delta\chi$ が式(1)は1次に対し、式(2)は2次の依存を示すことから、(i)使用する粒子の粒径を制御することによる方法、(ii)粒子を存在させる周囲媒体の濃度を制御する方法、および(iii)磁場強度と磁場の空間分布を制御する方法、が考えられた。そこで、これらの3つの手法に関して、分子動力学法を用いたシミュレーションと実験の両面から検討を進めた。

さらに、格子間隔をより幅広く制御するため、磁場強度分布の制御を試みた。本研究では、超伝導磁石内にさまざまな条件で磁性体を挿入し、広い範囲で平坦な磁場強度分布を得られる磁性体の配置を検討した。解析は有限要素法を用い磁場計算ソフトウェアによって行った。また、シミュレーションによって磁性体を用いずに格子間隔を制御した場合の実験結果と比較し、格子間隔制御への影響を検討した。

【実験】

格子間隔の自在な制御手法に関する実験とシミュレーションに用いた物質・媒体の物性値を表 1 に示す。本研究では、重力に対して平行な方向に直径 100 mm の室温ボアを有する超伝導磁石を用いて磁場を印加した。図 2 (c) に示すように、磁場はボア軸上の中心位置($z = 0$ mm)で最大 13 T で、上下の両端に向かって減衰する。ボア軸に直交する面内での磁場分布は、おおむね、ボア軸から壁面に近づくに連れて磁場が強くなるが、図 2 (b) に示すように、面内での磁場変化の大きさは、ボア軸 (z 軸) 上の磁場中心位置 ($z = 0$ mm) で最大で、磁場中心から離れるにしたがって小さくなり、 $z = 182$ mm の位置ではほぼ一定 (それでもわずかに中心位置の磁場が弱い) 状況となる。

実験は、図 2 (a) に示すように、塩化マンガン水溶液とそれぞれの粒子を、モーゼ効果や表面張力の影響を受けないように容器中に封入したうえ、形成される粒子の組織を CCD カメラにより観測した。粒子数はいずれの実験でも 7 粒子とした。(i) では、表 1 に示した全ての粒子を用いた。このとき、粒子の粒径以外の条件を一定にするため、 $z = 0$ での印加磁場を 13 T、実験位置は $z = 182$ mm、塩化マンガン水溶液濃度は 40wt% とした。(ii) では、粒子として直径 600 μm のガラス粒子を用い、中心印加磁場 13 T、試料位置を $z = 182$ mm とし、周囲媒体である塩化マンガン水溶液の濃度を 10wt% から 40wt% まで 5wt% 刻みで変化させた。また (iii) では、粒子として直径 600 μm のガラス粒子を用い、粒子が存在する面での磁場強度を変化させた。その際、面内での中心から 3 mm の範囲での印加磁場による磁気ポテンシャルの変化が一定となるよう、磁場中心からの距離を変化させた。塩化マンガン水溶液濃度は 40wt% とした。

また、シミュレーションでは、分子動力学法を用い、(i) から (iii) の全ケースについて実験と同じ条件で計算を行った。この手法では、ランダムな粒子配置からスタートし、各時間における磁気力と粒子間相互作用を全粒子について考慮しながら、粒子位置が平衡になるまで計算を続けた。

さらに、磁性体を挿入することによる空間磁場制御手法の検討については、磁場解析ソフトウェアとして OPERA3D を用い、有限要素法によって磁場強度分布に対する影響を検討した。超伝導磁石中に鉄製の円盤を挿入してその磁化を利用して周囲の磁場強度分布を変化させることで、より強く、かつ均一な磁場空間を得られる条件を考察した。その際、磁場中心から半径 50 mm、高さ 200 mm の範囲を計算領域とし、一辺の最大長さが 1 mm となるようなメッシュを作製して計算を行った。本研究では磁性体の位置、直径、厚さ、および枚数をパラメータとして様々な条件で磁性体を挿入した場合の磁場強度分布を計算した。得られたデータから、ボア内の広い範囲で平坦な磁場強度分布を得られる条件を抽出し、シミュレーションによって格子間隔制御への影響を検討した。

【結果】

図 3 は、格子作製条件を変化させることで格子間隔の制御を試みた実験とシミュレーションの結果を示す。(a)、(b)、(c) はそれぞれ粒子の粒径、周囲媒体の濃度、および印加磁場強度をパラメータとした時の格子間隔の変化である。図 3 の縦軸は、全てのグラフにおいて粒子径で規格化した格子間隔を示し、横軸は(a)では $V\Delta\chi$ (粒子径と相関)、(b)では $\Delta\chi$ 、(c)では面内の中心磁場強

表 1: 粒子と周囲媒体の物性値

材質	d (mm)	ρ (kg/m^3)	$\chi \times 10^5$ (-)
金	1.0	1.93E+04	-3.45
ガラス	0.8	2.50E+03	-1.55
	0.6		
	0.4		
青銅	0.5	8.61E+03	-1.15
	0.15		
周囲媒体 (40 wt%MnCl ₂)		1.43E+03	81.0

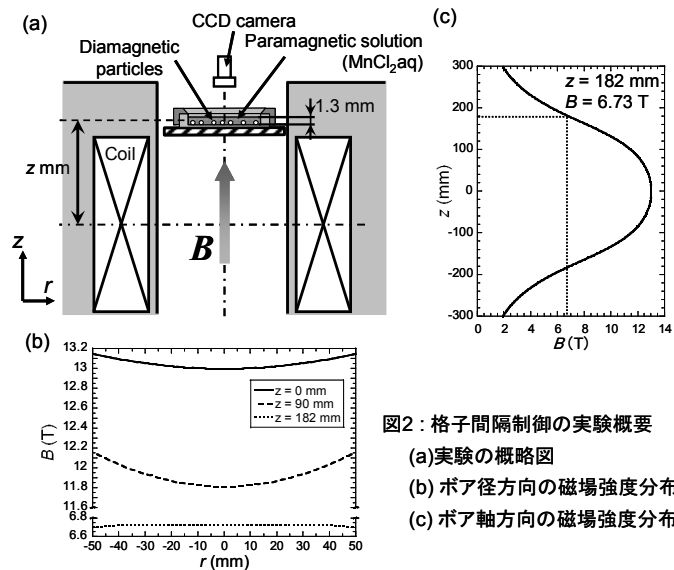


図 2: 格子間隔制御の実験概要

- (a) 実験の概略図
- (b) ボア径方向の磁場強度分布
- (c) ボア軸方向の磁場強度分布

度とした。円形のシンボルは実験結果、菱形のシンボルはシミュレーション結果を示し、エラーバーは標準偏差を示す。また、(d)は、図 3(b)中 A、B の各条件で得られた実験結果を示す。これらの結果から、粒径を小さくする、周囲媒体の濃度を濃くする、または印加磁場強度を強くするにつれて相対的な格子間隔が広がり、格子間隔を粒子径の約 1.7 倍から 4.0 倍までの範囲で制御できることが実験・シミュレーションの両面から確認された。

また、空間磁場分布の制御に関する検討結果の一例として、図 4 に、直径 70 mm、厚さ 20 mm の鉄製円盤を、その上面が磁場中心から 10 mm となる様に配置する場合 (b) と、鉄製円盤の無い場合 (a) の空間磁場分布を示す。この条件では、鉄製円盤の挿入により面内における空間磁場の大幅な均一化が確認された。また、図 5 には、図 4(b) の場合と前述の実験で基準とした位置 $z = 182$ mm における磁場強度分布の均一性の比較を示す。ここで、縦軸は各位置での磁場強度を面内中心での値で規格化した量を表す。これらの結果から、磁性体を用いることで、ボアの中心から径方向に約 20 mm の範囲 (直径 600 μm のガラス粒子 300 粒子が配列するとき粒子が分布する範囲) で空間磁場分布がより均一となり、かつ 2 倍近い磁場強度を印加して構造形成を行うことが可能になることが示された。これにより、これまで周囲媒体として 40wt% の塩化マンガン溶液を必要とした格子間隔を 30wt% 以下で実現できるなど、組織制御条件に大きな自由度を与えることが期待される。

【本研究の成果】

本研究によって、磁場による三角格子構造制御法に関する知見を集積できた。このことは、誘起磁気双極子間相互作用を利用した自己組織的構造形成の利用が、配列構造を有する材料作製プロセスに有用であることを示唆している。

【学会発表】

1. ICMS 2007 “Control of the lattice spacing in the triangle lattice of feeble magnetic materials formed by interactions among the induced magnetic dipoles”
2. 第 55 回 応用物理学関係連合講演会「誘起磁気双極子間相互作用を用いた弱磁性粒子の三角格子構造の制御」

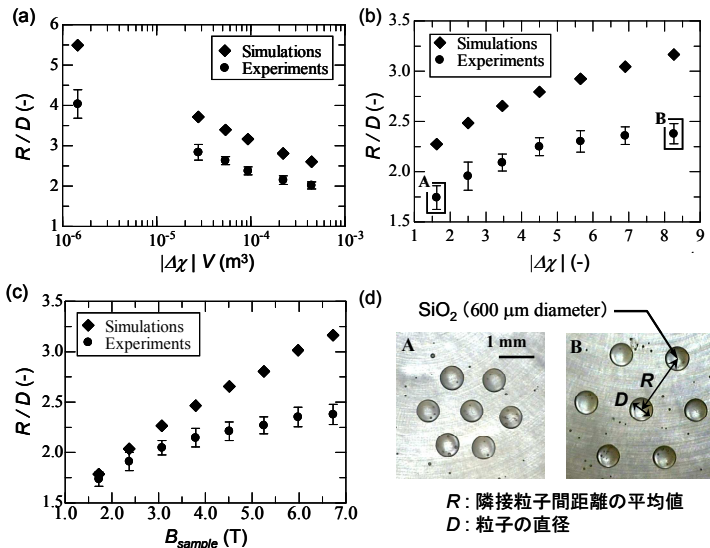


図 3：格子間隔制御の実験結果

- (a) 粒子の体積による制御 (b) 周囲媒体との磁化率差による制御
(c) 印加磁場強度による制御 (d) (b)中 A、B の各条件での実験結果

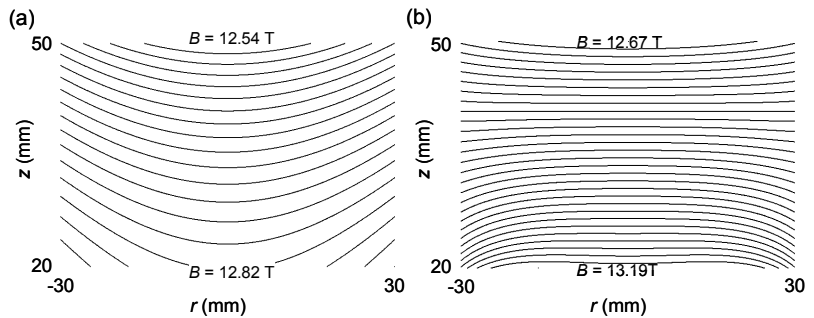


図 4：磁性体による磁場強度分布への影響 (等磁場曲線の間隔は 185 G)

- (a) 磁性体を用いない場合
(b) 直径 70 mm、厚さ 20 mm の磁性体を用いた場合

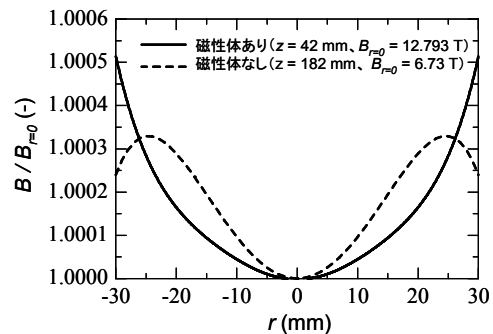


図 5：磁性体による磁場強度分布の平坦