

2次元双極子結晶の磁化

齋藤 吉彦*

概要

有限 2 次元双極子結晶の磁化率について、三角格子の場合と正方格子の場合との比較を行う。前者は 331 個の双極子系、後者は 361 個の双極子系に対する磁化率の数値計算で、前者の方が後者より大きいという可能性を得た。同時に三角格子結晶に現れる磁壁の移動を可視化した。

1. はじめに

方位磁石を結晶のように多数規則正しく並べると、三角格子の場合は強磁性、正方格子の場合は反強磁性を示す^{1,2}。大阪市立科学館ではこの現象を実際に観察する展示装置を製作し公開している。図1と図2がそれで、図1は方位磁石 1000 個を円形の容器に詰め込んだもので、格子欠陥を含んだ三角格子結晶である。図2は 20×20 個の方位磁石系が正方格子(上)と三角格子(下)の間を連続的に変形できる展示装置である。図3は図2の強磁性(三角格子)と反強磁性(正方格子)の状態に棒磁石を近づけたときの磁化の様子である。今日まで著者は、図3のデモンストレーションで、強磁性体による磁化が大きいことを直感的に説明してきた。しかし、数値計算による裏付けがないので、説得力に欠けるものであった。数値計算による裏付けを基にした解説が望まれるところである。



図1. 展示装置「磁石のテーブル」

直径 30mm の方位磁石 1000 個を円形の容器に詰め込んだもの。欠陥を含んだ三角格子結晶に磁区が出現している。

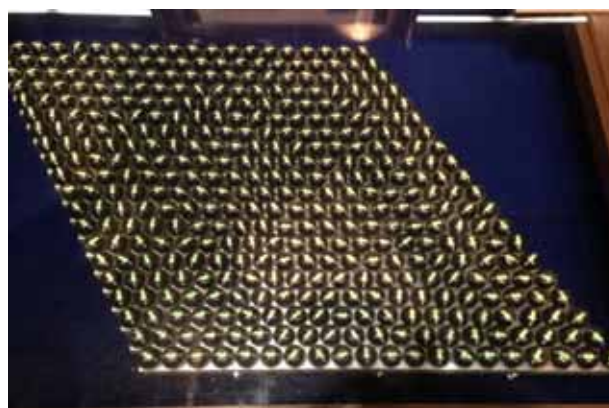
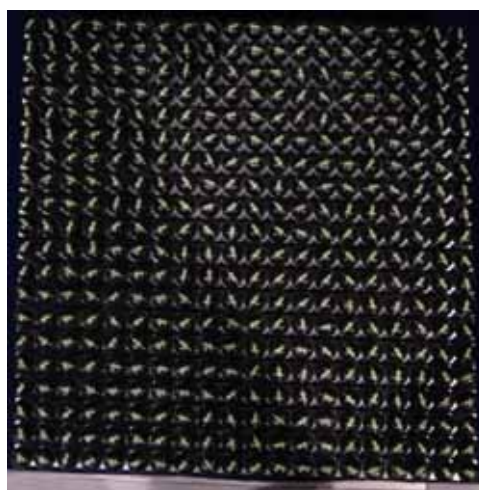


図2. 展示装置「方位磁石結晶」

直径 30mm の方位磁石 20×20 個を並べた装置で、正方格子(上)と三角格子(下)との間を自由に変形させることができる。正方格子(上)の場合は反強磁性、三角格子(下)の場合は強磁性が出現する。

*大阪市立科学館



図3. 方位磁石結晶の磁化

展示装置「方位磁石結晶」に棒磁石のN極を近づけて、正方格子(上)と三角格子(下)の磁化を比較したところ。正方格子の方が磁化率は小さいと思われる。

図1~3の方位磁石は直径30mmのプラスチック容器の中で3mmの棒磁石が水平面内で自由に回転できるようにしたものなので、2次元双極子系の数値計算がその裏付けを与えるであろう。したがって、以下では2次元双極子系の磁化率について、三角格子の場合と正方格子の場合の数値計算結果を与える。数値計算には、西松毅氏の公開ソフト³を本稿の計算用に改造したものを使用した。

2. 2次元双極子系の数値計算結果

図4~6は2次元双極子系の数値計算結果を可視化したものである。ここで、 $\text{exb}(*,*)$ と $\text{mag}(*,*)$ は外場と磁化のxy成分表示である。また、外場に対する磁化と磁化率の変化をプロットしたのが図7と図8である。以下では、これらの図について述べる。

図4は331個の三角格子双極子の外場に対する応答で、x軸に平行な外場を0から大きくしていった時の様子である。双極子群が一つの渦を描いているが、外場が大きくなるにしたがって、渦の中心がy軸方向へ移動しているのが見える。渦の移動とともに磁壁の移動も見えている。外場が0.6を超えると全ての双極子がx方向を向き、磁化はほとんど飽和する。外場の向きを変えても同様の渦の移動と同時に磁壁の移動が見られる。例えば、図5はx軸に対して30°の角度で外場を与えた場合で、渦の移動の方向が外場の向きに応じて変化しているのが分かる。磁壁の移動も見えている。

図6は361個の正方格子双極子系の外場に対する応答で、x軸に平行な外場を0から大きくしていった時の様子である。外場が0.1で中央部の大きな領域にパターンの変化が見られるが、反強磁性の縮退した別の状態への変化である²。外場が大きくなるにしたがって、この領域が大きくなるのと同時に、この領域で双極子の向きが外場の方向へ揃い始める。

上記数値計算において、外場の変化に対する磁化と磁化率をプロットしたのが、図7と図8である。ここでangleはx軸と外場の向きがなす角の大きさである。三

角格子の場合は、磁化率は外場が大きくなるにしたがって、2.5の辺りから1に減少している。正方格子の場合は、外場の方向に依存する傾向が強いが、磁化率は0.5から2.0程度で、三角格子の場合より小さい。

3. まとめ

有限2次元双極子系の磁化率について、三角格子と正方格子の場合を数値計算で比較した。その結果、外場が0.1での磁化率は、三角格子の場合は2.5前後、正方格子の場合は0.5~1.0が得られた。磁化率は三角格子の方が正方格子より大きい可能性が強いと思われる。

三角格子の場合は、渦の中心が境界に近づくにつれて、境界の影響を強く受けるのが分かる。また、本稿では外場を徐々に大きくする計算結果だけを与えたが、減ずる方向を計算すればヒステリシスが得られる。ここではヒステリシスの言及に留めて、次の報告で計算結果とともに論じる。

正方格子の場合は、図6の中央部が無限系の場合の変化²を近似的に表しているもので、磁化率が外場の角度に依存することは理解できるであろう。また、正方格子の基底状態も無限に縮退しており、異なった基底状態における磁化率も多様な値を与えると思われる。

今後の課題

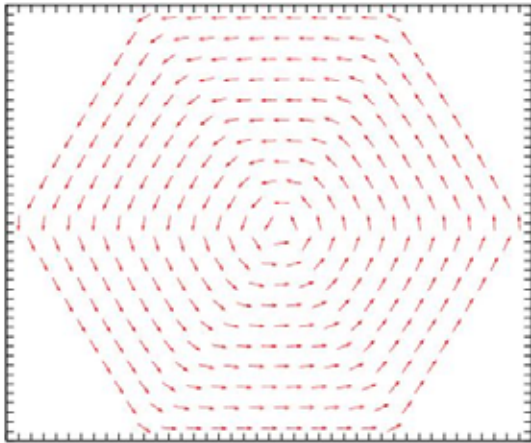
① 磁化率大小の結論

双極子系のサイズが、三角格子の場合は331個の双極子系、正方格子の場合は361個の双極子系と、小さいので、境界の影響が大きく出ていると思われる。しかし、サイズを大きくして再計算しなくても、今回の小さなサイズで境界の影響の小さい中央部辺りを吟味することで、磁化率の大小の結論が得られるであろう。

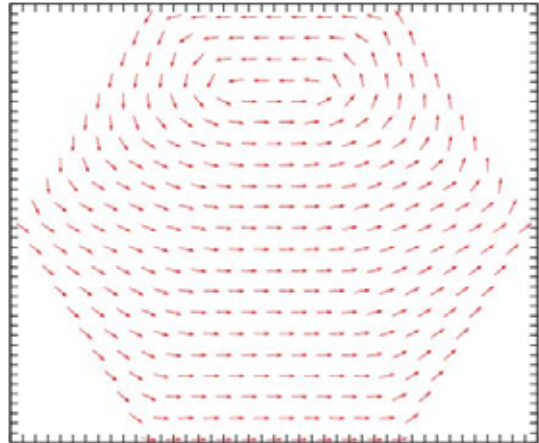
② 相転移?

正方格子の場合に磁化率の急激な立ち上がりのあること分かる(図8)。何が生じているのであろう?

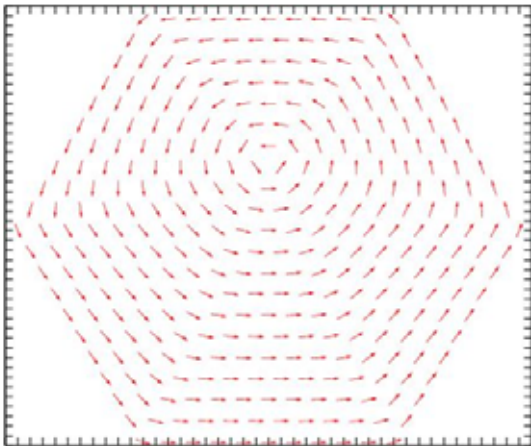
exb(0.0000 0.0000) mag(-0.0197 -0.0342)



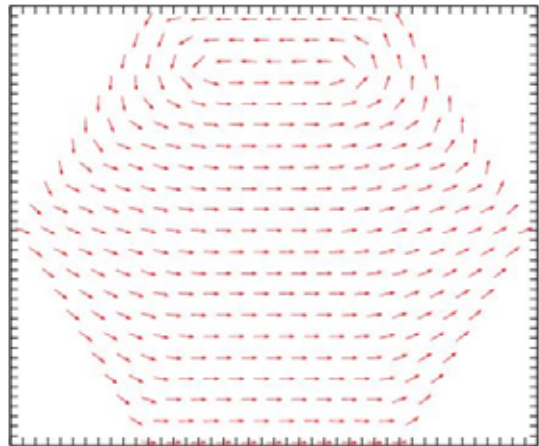
exb(0.4000 0.0000) mag(0.6178 0.0000)



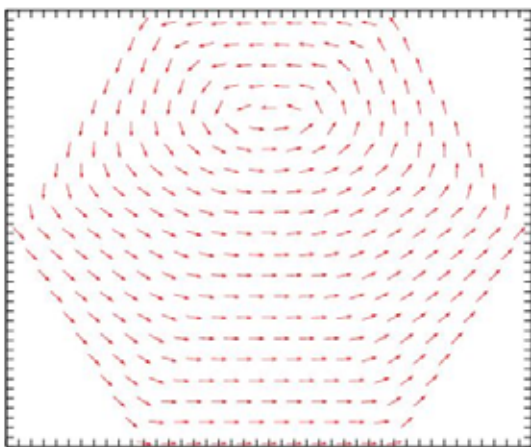
exb(0.1000 0.0000) mag(0.2729 0.0000)



exb(0.5000 0.0000) mag(0.7158 -0.0000)



exb(0.3000 0.0000) mag(0.5140 0.0000)



exb(0.6000 0.0000) mag(0.9797 -0.0000)

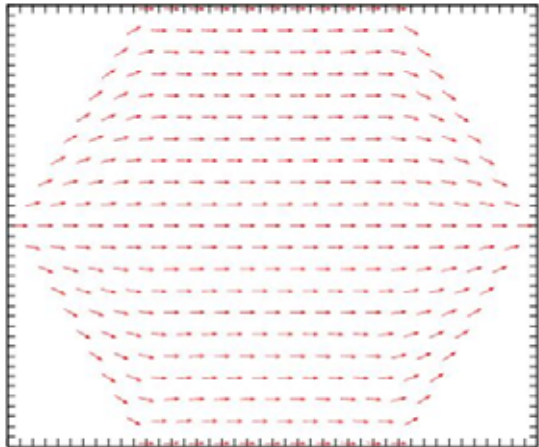
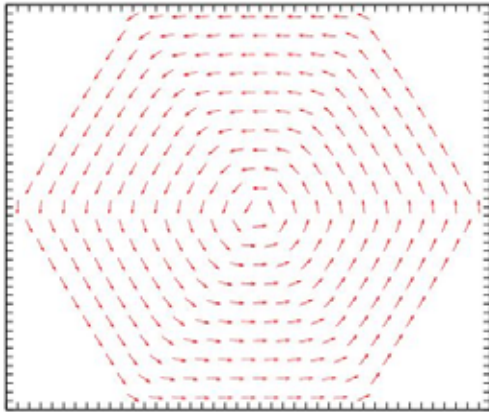
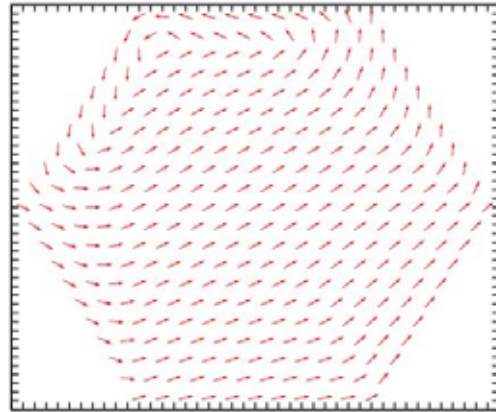


図4. 三角格子双極子系 angle=0°

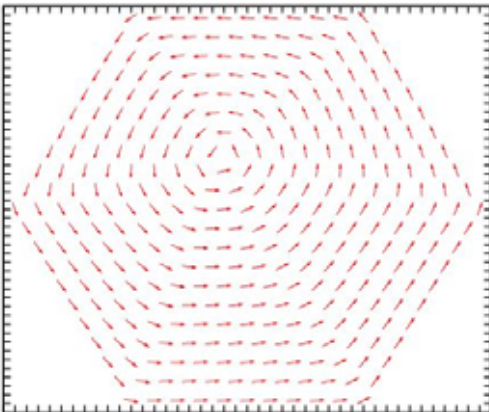
exb(0.0000 0.0000) mag(-0.0197 -0.0342)



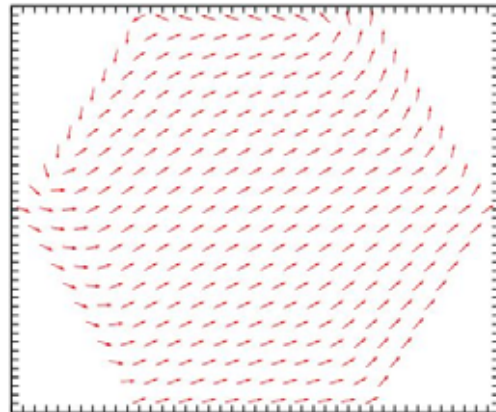
exb(0.4331 0.2499) mag(0.6830 0.3941)



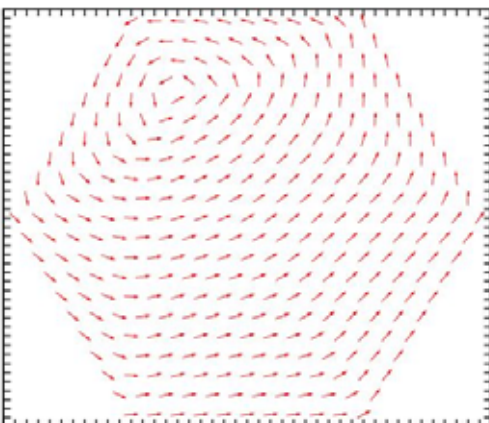
exb(0.0866 0.0500) mag(0.2187 0.1108)



exb(0.5197 0.2999) mag(0.7592 0.4381)



exb(0.2598 0.1499) mag(0.5335 0.3078)



exb(0.7795 0.4498) mag(0.8539 0.4927)

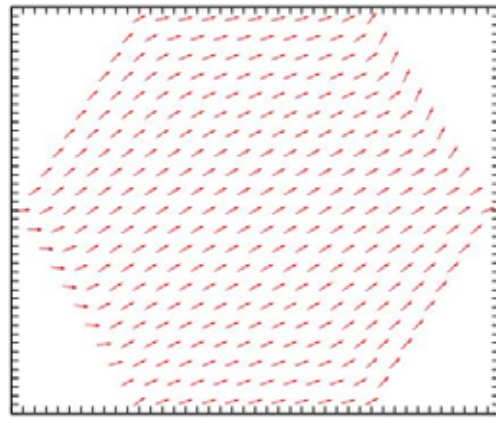
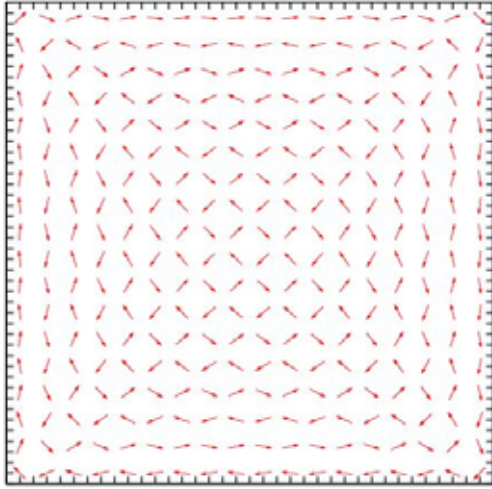
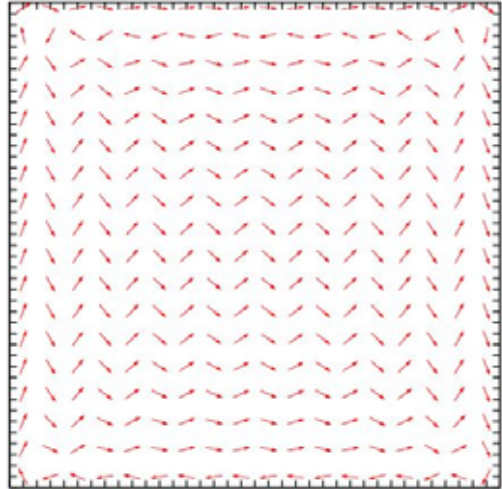


図5. 三角格子双極子系 angle=30°

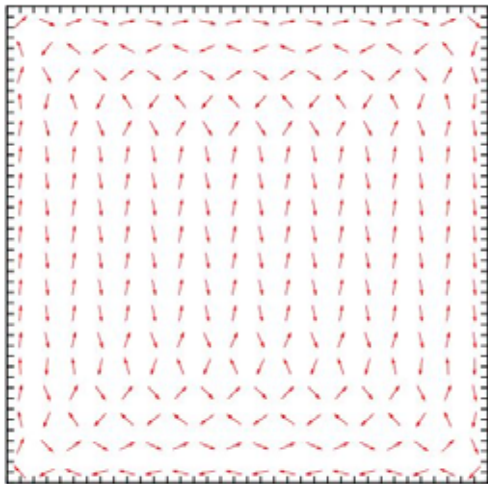
exb(0.0000 0.0000) mag(-0.0000 0.0000)



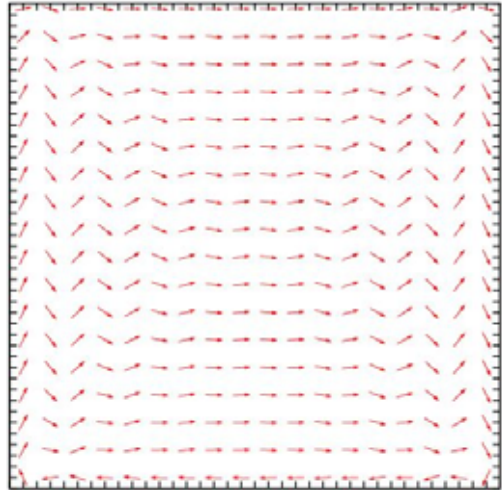
exb(0.4000 0.0000) mag(0.5596 0.0000)



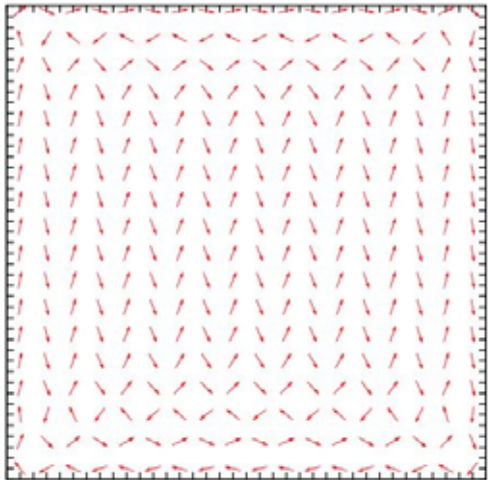
exb(0.1000 0.0000) mag(0.0997 -0.0000)



exb(0.5000 0.0000) mag(0.7619 -0.0000)



exb(0.2000 0.0000) mag(0.2539 -0.0000)



exb(0.8000 0.0000) mag(0.9475 0.0000)

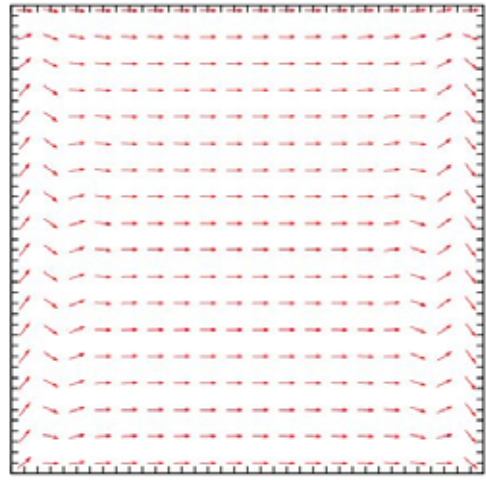


図6. 正方格子双極子系

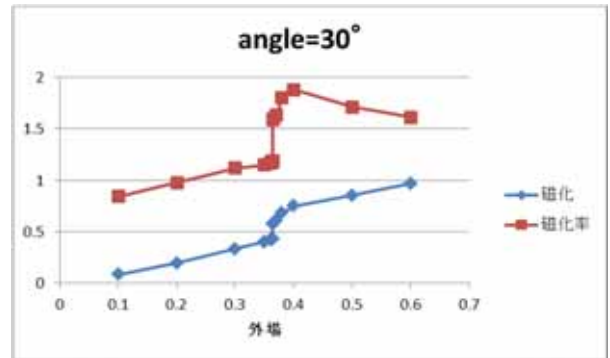
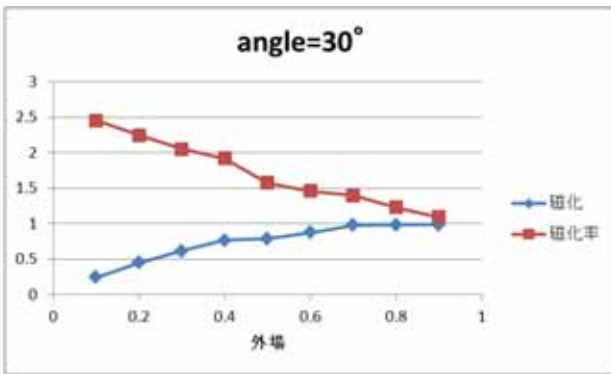
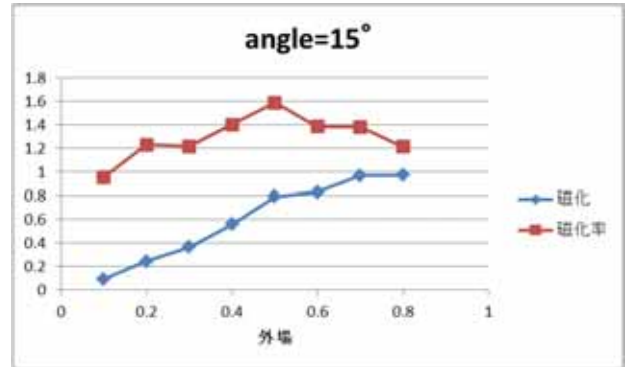
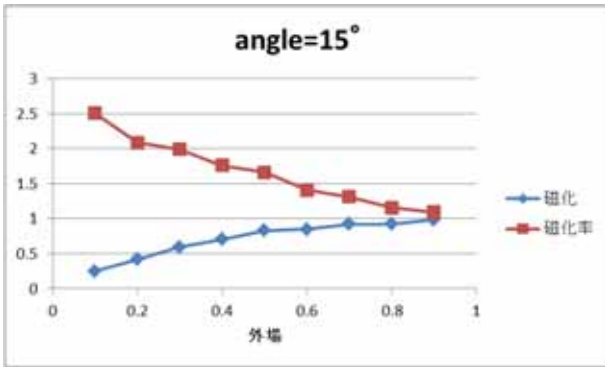
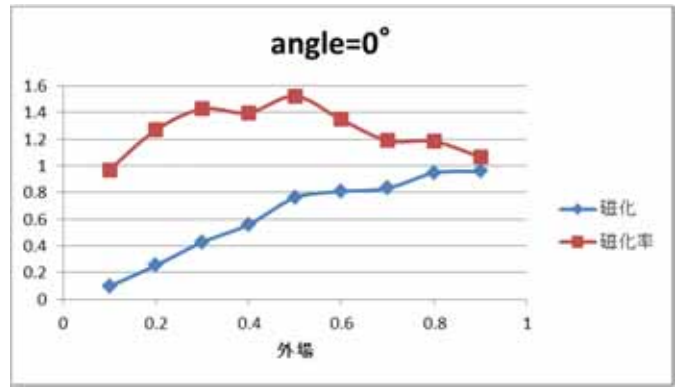
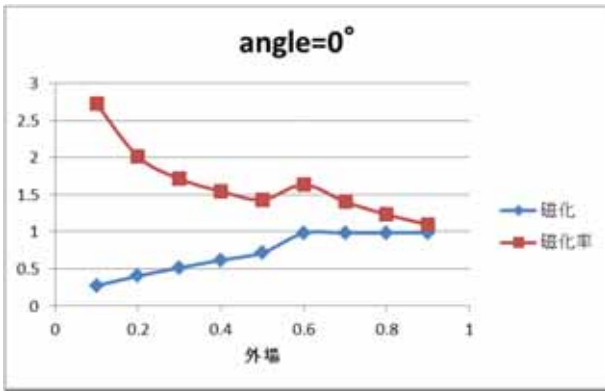


図7. 三角格子双極子系の磁化と磁化率

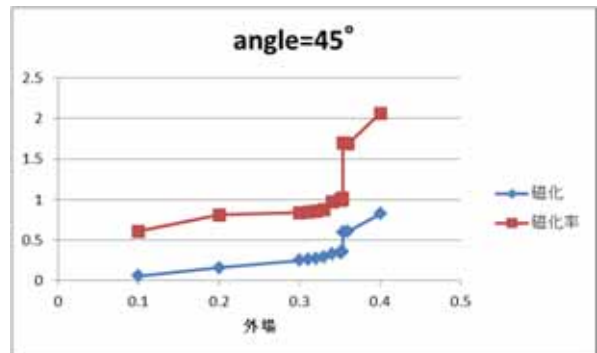


図8. 正方格子双極子系の磁化と磁化率

¹ 齋藤吉彦:物理教育 53(2005) 103-108

² 齋藤吉彦, 西松毅:近畿の物理教育 14 (2008)2-7

³ <http://loto.sourceforge.net/compasses/>