

磁化プラトーにおける異方性とランダムネスの効果

理化学研究所（現在 九州大学理学部） 戸塚圭介¹

1 はじめに

最近、低次元量子磁性体の磁化過程におけるプラトー現象が関心を集めている²。特に、（擬）一次元系での磁化プラトー現象は、ここ2、3年でかなりよく理解されるようになってきた[1]。一次元では、(i) 朝永-Luttinger 液体論に基づく（弱結合）現象論、(ii) Lieb-Schultz-Mattis(LSM) 流の議論、(iii) 強結合展開など、いくつかの強力なアプローチがあるが、それらの指し示すところによると、磁化プラトーの発生にとって、系（或いはモデル・ハミルトニアン）の持つ周期性と、有限磁化のところで存在しているある種の磁化の密度波（電荷密度波を想起されたい）との整合性が本質的に重要な要素であり、超流動（金属）・絶縁体転移との著しい類似性が成り立っている。これは、一見、全く異なった LSM 流の議論 [2] によっても裏付けられている。

一方、こういった考察はある意味で非常に理想化された状況を想定しており、現実には、超流動（金属）・絶縁体転移的描像の根底にある粒子系とスピン系とのアナロジーをこわし得るさまざまな異方性、あるいは、結晶格子の周期性を破る格子不整、不純物、といった要素も存在する。これらの要素が磁化プラトーにどのような影響を与えるかを、(i) 面内の回転対称性を破る異方性、(ii) ランダム磁場、ランダム交換相互作用の2つに限って考察する。

2 異方性の効果

上述のように、交換相互作用に異方性があったり、1 イオン異方性があったりして磁場に垂直な面内の回転対称性の破れている系は、粒子系の言葉に直すと、粒子数が保存しない系に対応する。このような場合、プラトー相を（電荷）ギャップのある絶縁相と見なし、磁場でギャップがつぶれると磁化が立ち上がる、と考える描像は変更を受ける。以下、異方性としては、 $\sum_j (S_j^x S_{j+1}^x - S_j^y S_{j+1}^y)$ のタイプ（exchange anisotropy）と、 $\sum_j [(S_j^x)^2 - (S_j^y)^2]$ （single-ion anisotropy）を想定する。また、モデルの詳細によらない議論をするために TL 流体に基づく現象論を用いる。

¹E-mail: kei4scp@mbox.nc.kyushu-u.ac.jp

²一軸異方性の非常に強い反強磁性体では、磁化が滑らかに増加しないような例が古くから知られていたが、最近注目を集めている例では異方性は必ずしも本質的でない。

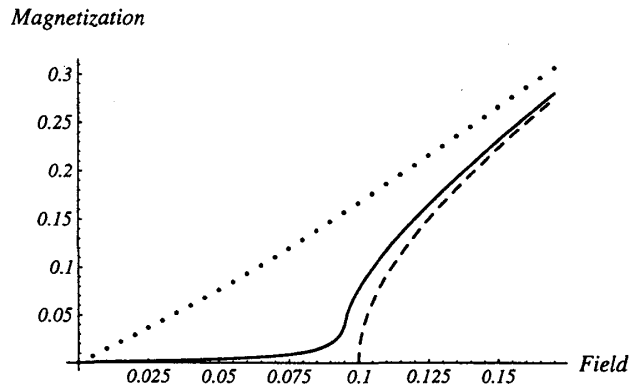


図 1: $N = 1$ の場合の磁化曲線（実線）。破線、点線はそれぞれ異方性のない場合、異方性が大きく完全にプラトーの痕跡がなくなる場合。

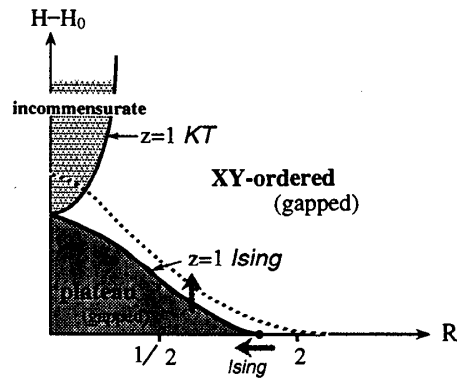


図 2: $N = 1$ の場合の相図。異方性のない時と異なり、ギャップの閉じるのは、転移点の上だけで、その両側にはギャップがある。

その結果、次の様なことがわかった [3]。磁化プラトーは、プラトー相での磁化の秩序（一次元なので、面内の秩序はなく、いわゆる磁場に平行な方向の collinear な秩序のみ可能）が格子の周期の何倍になるかという整数 N でラベルされるが、この N の値によって異方性の効き方がまったく異なる。特に異方性が状況を定性的に大きく変えてしまう $N = 1$ に限定して述べよう。詳しいことは省略するが、異方性のある系を記述する相互作用のついた TL 模型（sine-Gordon 模型）をくりこみ群、Luther-Emery technique で扱ってやることで、磁化曲線（図 1）と相図（図 2）が得られる。注意すべきは、磁場誘起転移（2次元イジング転移）点の上ではギャップが開いているにもかかわらず磁化は上昇し、帯磁率の異常性がよく知られた inverse square-root 発散から、対数発散に変わることである。異方性の大きさがある有限の臨界値を超えると、このイジング転移そのものが消滅する（図 1 の点線を参照）。整合度 N が大きくなると、次第に異方性の磁化プラトーへの影響は小さくなる。

3 ランダムネスの効果

次に、格子の周期性を壊すランダムネスの効果を検討する。これは、プラトールをモット絶縁体と見る描像では、ランダムネスとモット絶縁体との競合という、近年、電子系、ボーズ粒子系で関心を持たれている問題のスピン系版と見することもできる。また、ランダム量子スピン系自体、純粋系と異なる新奇な基底状態を持つことから、活発に研究されている[4]。以下、話を簡単にするため（クエンチされた）ランダム磁場に限る。

さてここでも、やはり現象論的な手法を用いるが、その前に強結合展開[5]で調べて予想をつける。その結果、やはりここでも整合度 N が重要で、 $N = 1$ のクラスに属する $S = 1$ ボンド交替系や、 $S = 3/2$ large- D 鎖での磁化プラトールは（あまり大きくない）ランダム磁場に対して安定なのに対し、 $N = 2$ に属する $S = 1/2$ ジグザグ梯子のプラトールは無限小のランダム磁場で破壊される。

次に、現象論的なボゾン・ハミルトニアンに対してレプリカ法とくろこみ群を用いるアプローチ[6]でこの問題を調べることににより、強結合展開の結論と矛盾しない結果を得た[7]。ボンド・ランダム系では、十分強いランダムネスの下では random singlet 相などが実現されると考えられているが、ここでは、少なくとも強結合展開で考察したようなクラスの模型に対しては、ボーズ・グラス的な、局所的な性質が支配的な相が実現するようである。当然、プラトールは消滅してしまう。整合度 $N = 1$ では、ランダムネスによって、プラトールからボーズ・グラス的な非プラトール相への転移が誘起されるが、この転移の詳細などについては将来の課題である。

参考文献

- [1] 押川正毅, 戸塚圭介, 山中雅則, 日本物理学会誌「最近の研究から」に出版予定.
- [2] M. Oshikawa, M. Yamanaka, and I. Affleck, Phys.Rev.Lett. **78** (1997), 1984.
- [3] K. Totsuka, Euro.Phys.J. B5 (1998), 705.
- [4] 本研究会報告にも Hida によるスピン 1 系の結果や、Sigrist 等による研究成果が掲載されている。
- [5] たとえば、K. Totsuka, Phys.Rev.B **57** (1998), 3454.
- [6] T. Giamarchi and H.J. Schulz, Phys.Rev.B **37** (1988) 325,
V. Brunel and Th. Jolicoeur, Phys.Rev.B **58** (1998) 8481.
- [7] K. Totsuka, 準備中