

Title	スピングラスの凍結程度を表す指標
Author(s)	笠井, 康弘
Citation	大阪大学低温センターだより. 1985, 52, p. 10-12
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/10615
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

スピングラスの凍結程度を表わす指標

工 学 部 笠 井 康 弘 (吹 田 4 6 7 9)

1. はじめに

強磁性体および反強磁性体からつくられたランダム磁性体が低温において示す「スピン凍結状態」をスピングラス¹⁾と呼んでいる。一般に交換相互作用はスピンを適当に配向させるが、配置によっては、スピン配向に矛盾が現われることがある。例えば、イジングスピン系において反強磁性相互作用(ボンド)が三角形をつくっている場合、その上のスピンをどのように配向しても、すべてのボンドで最低エネルギー状態を取ることはできない。このような相互作用によるスピン配向の矛盾をフラストレーションと呼ぶ。スピングラスは相互作用のランダム配置によって生じたフラストレーションに強く影響されていると考えられる。実験的に知られている代表的な性質は、帯磁率に温度の関数としてカスプが現われる一方比熱には異常がないことである。比熱に異常のないことは、スピングラスが本当の長距離秩序ではないことを示唆しており、シミュレーションの結果もそれを支持している。さらにスピングラス系に秩序の存在を仮定した平均場理論を適用すると、自由エネルギーが不安定になることも知られている。平均場理論がうまく行かないという事は、取り扱いが極めて困難であることを示唆しており、今日に至っても統計力学的に満足 of いく理論はできていない。ここでは、スピン凍結状態を把握するひとつの考えとして、凍結の程度を測る指標を提案する。なお、準安定性を考慮した秩序パラメーターによるアプローチも現在盛んに行なわれているが、¹⁾ここでは取り上げない。

2 ミクロ・クエンチ系の指標

まず、この指標を見出すきっかけとなったカステレイン-フォルツィン²⁾(K-F)の強磁性イジングスピン系からパーコレーション問題への変換法について述べる。ここでパーコレーション問題とは、ある格子上にオンボンドとオフボンドの二種類のボンドをランダムに配置したとき、如何なる確率でオンボンドを与えれば無限に大きなオンボンド・クラスターが現われるかを基本問題として、そのクラスター現象を定量的に解析することである。直感的にいえば、強磁性秩序は隣接するスピンの平行配向をする短距離秩序がさらに集積して無限に大きなクラスターを形成した状態である。K-F変換によって得られたパーコレーション問題の母関数はその状態を定量的に表現している。イジング系におけるスピン対の平行および反平行配向はパーコレーション問題におけるオンボンドおよびオフボンドの配置へと変換される。その結果、強磁性イジング格子の分配関数は、各項がオン・オフ・ボンドグラフ(あらゆる可能なグラフ)によって表わされる展開式となる。秩序パラメータ即ち磁化は統計的主要項において無限大オンボンド・クラスターのボンド占有比率である。従って、このオンボンドこそ強磁性秩序の要素であるが、これは最低エネルギースピン対である平行スピン対とは一致しない。反平行スピン対はすべてオフボンドに読み換えられるが、平行スピン対の中にはオフボンドとなるものも存在する。従って、オ

ンボンドは熱攪乱によって偶然平行スピ対となったものを除いた、真の凍結スピ対であると考えられる。即ち、オンボンドは基底状態におけるスピ凍結を有限温度においても保存したスピ対と考えることができる。この意味でオンボンドをFROZEN RIGHT-BOND (FRB)、凍結適正ボンドと呼ぶことにする。ここで、RIGHT-BONDとはボンドによって結ばれたスピ対のエネルギーが最低となる状態を指し、強磁性の場合は、平行スピ対のことである。FRBの濃度がある閾値(臨界濃度:多くの格子で精度良く求まっている)を越えると無限に大きなFRBのクラスターが現われる。これは前に述べたように秩序パラメータに対応している。従って、このFRBの濃度を求め、閾値と比較することにより強磁性秩序の程度がつかめる。この意味でFRBの濃度を強磁性秩序の指標と考えることができる。このFRBの概念がフラストレーションを含む格子へ拡張できるかどうかの一つの関門である。まず、 $\pm J$ ボンドを任意に配置したイジング格子を考える。これはボンドが固定されているのみならず、その詳細がわかっている意味でマイクロ・クエンチ系と呼ぶことにする。強磁性格子(非フラストレート格子)について工夫されたK-F変換法をマイクロ・クエンチ系(フラストレート格子)にそのまま適用することはできないが、少し工夫すれば次に述べるような形でそれを求めることができる。非フラストレート格子においては母関数にあらゆる可能なボンドグラフが現われた。フラストレート格子においては、ボンドグラフの中にフラストレートした「オンボンドの閉じた連鎖」が含まれる場合、対応する項が「欠落」する点のみが非フラストレート格子の母関数と異なっている。また、その母関数がFRB数を制御する逃散能による大分配関数型の表現となっていること、およびスピ自由度を反映する統計重みを含むことを付記しておく。この特長はFRBの定量をするときに利用される。

3. クエンチ系におけるFRBの計量

現実的なランダム磁性体での $\pm J$ ボンド配置は、高温におけるアニール系(熔融状態:熱により $\pm J$ 配置が変動する)のボンド配置を急冷によって固定したクエンチ系と呼ばれる統計力学的状態である。クエンチ系は $\pm J$ 配置が固定されている点ではマイクロ・クエンチ系の一種であるが、さらに母集団であるアニール系において熱力学的に主要なボンド配置をもつものでなければならない。そこで、まず有限温度(T_A とする)のアニール系に関するFRB状態を求める。アニール系の分配関数はあらゆる可能なマイクロ・クエンチ系の分配関数の和として表わされるので、FRBグラフ展開は厳密に求めることができる。その母関数は「欠落」をもたない一様系としての構造をもつが、逃散能はマイクロ・クエンチ系に比べ減少し、スピ自由度は形式的に1となる。このアニール系から熱力学的に主要なマイクロ・クエンチ系を取り出すことを考える。この体系を T_A -クエンチ系と呼んでおく。クエンチ系は $T_A \rightarrow \infty$ の極限として求まる。しかし、 T_A -クエンチ系も非一様系であり、その母関数を直接解析することは難しい。そこで T_A -クエンチ系に対する一種の一様系近似を導入する。我々の場合、FRB数を保存する形で一様化すれば充分である。即ち、 T_A -クエンチ系を一様な強磁性相互作用をもつイジング系(スピ自由度2)と均り合わせる。そのためには、一様イジング系の逃散能をアニール系のそれと等価にすれば良い。以上により、温度 T_A においてのみではあるが、 T_A -クエンチ系のFRBが求まる。その $T_A \rightarrow \infty$ の極限から、クエンチ系のFRB濃度の高温漸近形が求まる。高温極限でのFRB濃度は当然0であるが、0への接近の程度が求まるのである。一方、 0°K におけるFRB濃度は十分な精度で求めることができる。高温極限と 0°K のFRB濃度を組み合わせて、FRB濃度を温度の関数として表わす内

挿公式を導出することができる。ここで、問題となるのは、FRB濃度がパーコレーション 閾値と一致する特性温度である。一般的に、この特性温度は強磁性レギュラー格子の転移温度の $1/2$ より小さい。例えば、四角格子の場合、その比率は 0.288 程度となる。

4. ま と め

FRB濃度は、3 で求めた特性温度を通じて体系を高温域と低温域に分けるパラメータであり、スピン凍結に基づく特異現象は、この特性温度付近で起こるものと考えられる。ただし、フラストレーションは凍結したスピン自体に不安定をもたらし、本来の臨界現象は起こらない可能性がある。しかし、フラストレーションによるスピン反転時間に比べ充分短い時間スケールで観測した場合、FRBクラスターは秩序パラメータの如く振舞うであろう。もう一つ重要なことは、この短時間の準安定性はどの時点においても全く同様であり、より安定な相に移って行く途中の状態ではない点である。これは準安定状態を支配するFRB濃度が閾値を越えた場合に出て来る結論である。このような準安定の恒常性はスピングラスの特徴を良く表わしているものと考えられる。

〔参考文献〕

- 1) 鈴木増雄, 固体物理 19 (1984), 387.
鈴木増雄, 固体物理 20 (1985), 31.
- 2) P.W.Kasteleyn and C.M. Fortuin, *J. Phys. Soc, Jpn. Suppl.* 26 (1969), 11.