TITLE:

Renormalization Group Analysis of Nonequilibrium Phase Transitions in Driven Disordered Systems(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Haga, Taiki

CITATION:

Haga, Taiki. Renormalization Group Analysis of Nonequilibrium Phase Transitions in Driven Disordered Systems. 京都大学, 2018, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2018-03-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20895>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2020-08-01に公開; 許諾条件により要旨は2018-04-01に公開

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	芳賀大樹
論文題目	Renormalization Group Analysis of Nonequilibrium Phase Transitions in Driven Disordered Systems		
(論文内容の要旨)			
<p>自発的な対称性の破れが生じる相転移は、対称性のタイプや空間次元によって、いくつかのクラス（普遍性クラス）に分類される。平衡系においては、様々な系に対してこの分類がされており、大まかには完成しつつある。ところで、非平衡条件下において、自発的に対称性が破れる場合には、具体的に研究された例もまだ多くない。このような状況において、提出された芳賀氏の論文では、外力駆動された乱れた系で新しい相転移を報告している。</p> <p>乱れた系では、平衡系においても、普遍性クラスが異なることが知られている。例えば、$O(N)$ 模型においては、「乱れたD次元系の普遍性クラスは乱れない$(D-2)$次元系と等しい。」という次元削減と呼ばれる性質が期待されている。ただし、この性質はDが十分に大きいときには成り立つが、低次元系では成り立たず、その正確な理解は現在でも未解決である。</p> <p>芳賀氏は、乱れた$O(N)$ 模型に対して外力駆動を考えている。物理的には、多孔質中の対称性の破れを念頭に置いて、ランダムポテンシャル中に巨視的に一様な流れが加わることを表す単純な模型を提案している。これは、非平衡条件下で乱れた系における対称性の破れを理論的に議論できるもっとも簡単な系である。以上の背景が第一章で述べられる。</p> <p>この問題を理論的に考察するためには、ランダム系の関数繰り込み群を非摂動的に定式化し非平衡問題に適用する必要がある。まず、第2章で、乱れの相関の関数形そのもののくりこみ群（以下では、ランダム系のくりこみ群）がレビューされる。くりこみ群は標準的には摂動論的に定式化されるが、摂動論を超えるひとつのアプローチとして非摂動くりこみ群がある。第3章では、第2章で定式化されたランダム系のくりこみ群が非摂動論的に定式化される。そして、第4章でダイナミクスを含む非平衡問題に適用される。まず、素朴な解析で、模型特有の次元削減が議論される。これは、D次元ゼロ温度外力駆動ランダム$O(N)$系は、$(D-1)$次元の乱れない$O(N)$モデルと等価になる、という性質である。$D-3$を小さいパラメータとして、その1次までの寄与で、次元削減が成り立つNの範囲を求めている。また、$D=3$のときに相関長を具体的に計算している。</p> <p>以上の結果において、$D=3$, $N=2$ の場合が特別な状況にある。Nが小さいにも関わらず、次元削減が成り立つのである。つまり、外力駆動された乱れた3次元XY模型が乱れない平衡2次元XY模型と等価になる。したがって、Kosterlitz-Thouless (KT) 転移が生じることを意味する。この結果をより詳細に調べるために、第5章において、乱れが弱い場合の有効模型としてスピン波模型が導入される。まず、素朴な計算で準長距離秩序、すなわち、相関関数のべき減衰が示される。ついで、非平衡緩和法により、数値的にこの振る舞いが確認される。そして、ランダム系のくりこみ群の非摂動的定式化をこの模型に適用することで、素朴な計算結果が正しいことが示される。最後に、渦の効果を有効弾性定数として考慮することにより、KT転移点近くに対する現象論的模型が提案される。</p> <p>第6章では、全体がまとめられ、今後の展望が述べられる。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年、アクティブな要素の集団運動など、非平衡系における相転移に関する研究は活発に行われている。例えば、動的で華やかな現象を数値実験や実験室実験で示す研究が数多く報告されている。あるいは、数理物理として厳密に解けるモデルの近年の発展を踏まえた非平衡相転移の新しい側面が研究されている。このような状況で、本学位論文では、比較的簡単なモデルに対して、理論物理の難しい計算を行うことに特徴がある。

実際、第4章の計算は随所に技巧を要し、その計算手数は極めて多く、最後まで完遂するのは容易ではない。また、ランダム系のくりこみ群の非摂動的定式化を確率ダイナミクスに適用するためには、くりこみ群の現代的な発展を深く理解する必要がある。この際、第2章および第3章におけるランダム系のくりこみ群およびその非摂動的定式化の説明とその具体的な計算は教育的でもある。複雑な計算を手際よくまとめており、これからの研究にとっても有用な題材を与えている。

しかしながら、本学位論文の核心部分は、第5章にある。空間3次元において準長距離秩序を明確に示す系はこれまでに平衡系においても知られていない。本論文では、3次元XYモデルに対して乱れを加えて秩序を壊し、外力駆動という非平衡性によってその秩序を回復させる、というアイデアにより、乱れない平衡系の2次元XYモデルと等価になることを示している。このような次元削減の考えは、乱れのある平衡系の場合にはよく議論されてきたが、非平衡系での次元削減という考え方は本論文において初めて提示されたものである。当然、3次元系における準長距離秩序という質的に新しい性質を主張するには十分な証拠が必要とされる。芳賀氏は、数値実験、および、スピン波モデルを用いた徹底的な解析を行うことで、その信憑性を高めることに成功している。

以上のように、本学位論文では、難しい計算を完遂した第4章、および、物理的に極めて重要な内容を含む第5章を中心として、豊かな内容が報告されている。また、解析しているモデルそのものも芳賀氏が提案したものであり、独創的な着眼と言える。

その一方、外力駆動された乱れた $O(N)$ モデルの自然科学における位置づけについては議論の余地がある。例えば、そのモデルの振る舞いが実際の実験でロバストに観測されるのかどうかは定かではない。また、得られた結果の物理的な解釈についても完全に理解されているわけではない。これらの点について、今後の研究で明らかになれば、より素晴らしい結果として認められるであろう。本学位論文を拠点としてさらなる展開を期待したい。

主論文は145ページにわたって丁寧に書かれており、背景、結果、今後の展望が明確に表現されている。これまでに述べたように、本学位論文は、非平衡系の相転移の理解に関して大きな進展を与えるものと判断する。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年12月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 2018 年 4 月 1 日以降