

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00009

研究課題名（和文）情報理論によるスピングラスの研究

研究課題名（英文）Information Theory for Spin Glasses

研究代表者

村山 立人（Murayama, Tatsuto）

富山大学・学術研究部工学系・講師

研究者番号：80360650

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スピングラスと呼ばれる磁性体の平衡状態が、情報の不可逆圧縮過程を定義する方程式系の解として記述できる事実注目した。そして、すべての不可逆圧縮過程が原理的に破れない「レート・歪み限界」に基づいた解析的な物性評価を実施することで、数値的に再現するのが難しいスピングラスの臨界現象を厳密な立場で研究した。このシナリオは、統計物理学の概念と方法を積極的に情報工学の諸問題に適用してきた応用研究の動向を、基礎科学の立場から逆転させたものとしても興味深い。その結果、統計物理学におけるスピングラスの研究で、厳密評価に強い情報理論の数学的資産を転用するための処方箋をはじめ構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、統計物理学の概念と方法を情報科学の諸課題に応用していく従来の研究志向を逆転させているのが学術的な特色である。この新しいパラダイムの提唱によって、統計物理学の適用範囲が事実上拡大し、未知の現象の発見及びその理論的説明ができるようになる。特に、その複雑さゆえ、現在は数値解析が主流となっているスピングラスの研究に再び革新をもたらす可能性がある。また同時に、情報理論の新しい適用先が開拓できたという学術的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focus on the fact that the equilibrium state of a magnetic material, called spin glass, can be described as a solution to the system of equations that defines lossy compression of information. We used the analytical expression of the rate-distortion function which describes the best performance for lossy compression, so that we can theoretically evaluate the critical properties of spin glass without worrying about numerical issues. This scenario is interesting from the point of view of basic research, since it tries to reverse the methodological direction of the trend in applied physics, where concepts and methods of statistical physics have been applied to problems in information science. As a result, a classical theorem in information theory, which has been expected to be powerful in rigorous evaluations, proved to be useful as a toolbox for analyzing spin glass models as well.

研究分野：情報統計力学

キーワード：スピングラス 磁性体 平均場近似 情報理論 不可逆圧縮

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ガラスは普通の固体と違って、原子が規則的に集まっていない。空間的な配列だけを見ればむしろ液体に近い。実際、身近にあるガラスのコップも、何億年もすればアメのように変形すると考えられている。しかし、日常的な時間感覚では、原子の動きは不規則な状態に凍結していて、全く動いていないように見える。これに似た電磁氣的性質を示す磁性体がスピングラスである。

(2) スピングラスは、古典的な統計物理学の処方箋では理論的解析が難しい。しかし、この事実はかえって物理学者の興味をかきたて、1990年代にこれを解析できる数学的枠組が整備された。この過程で誕生したのが不規則系の統計物理学である。

(3) ところが、この新しい統計物理学は、単なる磁性体のための理論で終わらなかった。情報科学の分野に佇む数々の未解決問題にアプローチするための共通言語として再発見され、特にメッセージの符号化などを扱う情報通信の分野でその威力を発揮している(図1)。この結果、欧米の主要大学では、多くの物理学者が情報工学の専門家として転身した。

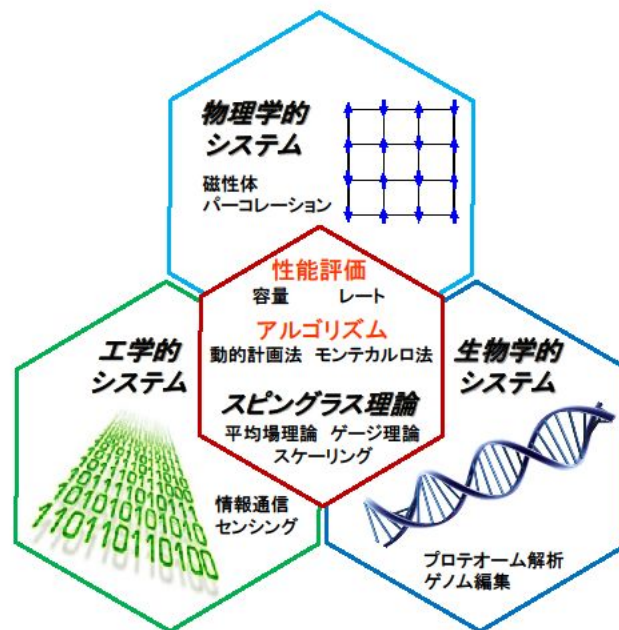


図1: スピングラス理論

2. 研究の目的

(1) 本研究は、統計物理学の概念と方法を情報科学の諸課題に応用していく最近の研究志向を逆転させているのが学術的な特色である。

(2) この新しいパラダイムの提唱によって、統計物理学の適用範囲が事実上拡大し、未知の現象の発見及びその理論的説明ができるようになる。特に、その複雑さゆえ、現在は数値解析が主流となっているスピングラスの研究に再び革新をもたらす可能性が高い。さらに、本研究が想定通りに成功すれば、情報理論の新しい適用先が開拓できたという学術的意義も大きい。

3. 研究の方法

(1) スピングラスをめぐる議論が情報通信分野に適用できた理由としては、その数学的構造が、誤り訂正や不可逆圧縮過程などの符号化の枠組と親和性が高かったからである(図2)。それならば、符号化の分析枠組として知られるシャノンの情報理論を、逆にスピングラスの物性解析に役立てられないだろうか。本研究では、このような問題意識を出発点にして、スピングラスの相図の大域的構造を決定する多重臨界点(multicritical point)の位置を理論的に計算するための処方箋を確立する。

(2) スピングラスの多重臨界点は多くの物理学者の興味をひく話題であり、特に数値的な立場による研究は非常に多い。一方、この多重臨界点の性質を理論的に明らかにするのは非常に困難な作業であり、通常、スピングラスの模型の種類を狭く限定してから個別に議論をしなければならぬ。本研究では、スピングラスの個性である電磁氣的な相互作用の自由度が、平衡状態の自由度を決定しているという一般的な事実に着目する。そして、この原理的状況を自由度の不可逆圧縮過程として代数的に表現することで、情報理論でよく知られている古典的定理を利用したスピングラスの物性解析を試みる。この結果、スピングラスの模型としての詳細に依存しない多

重臨界点の普遍的な挙動が明らかとなり、数値的に全ての自由度をシミュレートしなくても、ある程度の物性予測ができるようになると期待できる。

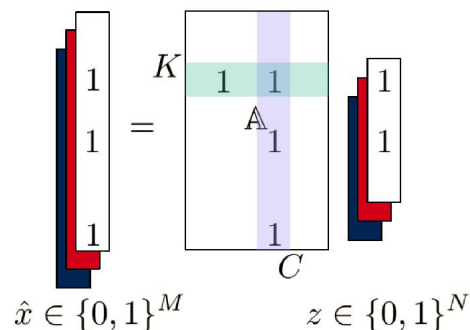


図 2：不可逆圧縮過程

4 . 研究成果

(1) これまでの統計物理学は、純粋な結晶や磁石などのように、原子間に均一な相互作用だけが存在する物質を扱ってきた。しかし、新しい統計物理学は、互いに競合する不均一な相互作用も許容する磁性体現象の解明を目指し、その結果、ガラスを抽象化した数学的模型であるスピングラスの概念が 1980 年代に確立した。

(2) やがて $\pm J$ 模型と呼ばれるスピングラスは、情報通信の分野で 1990 年代に登場した低密度符号化の概念と親和性が高いことが知られるようになる。特に、その平衡状態の記述は、符号化の性能評価と数学的に等価であることが研究代表者等により指摘されている。

(3) 本研究課題の研究代表者・連携研究者・研究協力者は、このスピングラス模型について、情報理論から要請される代数的な束縛条件を検証した。その結果、相互作用の個数と原子数の比率が非常に小さい状況で、情報理論が強い制約を与えている可能性があることを突き止めた。尚、本研究課題の最終年度では、 $\pm J$ 模型の最も単純な相互作用の形式について多重臨界点の計算に成功しており、プレプリントとして一般に公開している。

(4) 現在、プレプリントとして公開した内容について、いくつか重要な指摘を受けており、学術論文の投稿に向けた最終調整を実施している。当面は、このまま物理学分野で新規性の検証を進める予定であるが、将来的には、本研究の継続的な内容の研究課題として、情報科学分野での重要概念を理論的に再定義するための研究を実施したいと考えている。特に、情報の劣化と縮約の相互作用を理論的に取り扱うための処方箋の確立に貢献できると期待している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 村山立人	4. 巻 454
2. 論文標題 情報理論による適応的計測・通信システムの分析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 北陸経済研究	6. 最初と最後の頁 30～31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tatsuto Murayama, Peter Davis
2. 発表標題 Large deviation analysis of a prototypical system with noisy and networked sensors
3. 学会等名 Asia Pacific Society for Computing and Information Technology 2017 Annual Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Publons https://publons.com/researcher/2728031/tatsuto-murayama/ Google Scholar Citations https://scholar.google.com/citations?user=YsOfocEAAAJ arXiv.org https://arxiv.org/abs/1907.01048

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	デイビス ピーター (Davis Peter)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	斉藤 朝輝 (Saito Asaki) (60344040)	公立はこだて未来大学・システム情報科学部・准教授 (20103)	