

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01812

研究課題名（和文）スピンから捉えるガラス・ジャミング転移の物理：ソフトマターから情報統計力学まで

研究課題名（英文）Physics of Glass and Jamming Transitions Captured by Spins: from Soft Matter Physics to Statistical Physics of Information Processing

研究代表者

吉野 元 (Yoshino, Hajime)

大阪大学・サイバーメディアセンター・准教授

研究者番号：50335337

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本プロジェクトでは、スピン（回転自由度）の関わるガラス・ジャミング転移の物理と数理を広範な領域において分野横断的に研究した。具体的には、フラストレート磁性体、コロイドガラス、ベクトル変数の統計的推定・制約充足問題、深層ニューラルネットワークの学習理論において理論的、数値的に研究を行った。その結果、パイロクロア酸化物Y<sub>2</sub>Mo<sub>2</sub>O<sub>7</sub>における外的乱れなしに起こるスピングラス転移のメカニズムの解明、コロイドガラスのガラス・ジャミング相図の導出、多成分ベクトル自由度の統計的推定の理論性能の解析と推定アルゴリズムの実装、深層ニューラルネットワークにおける学習に関する統計力学的理論の構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガラスの物理学はソフトマターから固体物理学、情報科学にまでまたがる学際的問題である。本研究ではスピン（多成分ベクトルで表される回転自由度）に注目しつつ、外的な乱れによる通常のスピングラス転移とは本質的に異なる、スピンの自発的なガラス転移のメカニズムを解明する。このために、統計力学理論と数値シミュレーションによる研究を展開し、分野横断的に解析する。具体的には [A] フラストレートスピン系、[B] ソフトマター系、さらに [C] 多成分ベクトル変数を自由度とする制約充足問題や情報推定などの新しい情報科学の問題の解析を行う。以上の知見を統合し、[D] 「ガラス転移の数理」を抽出する。

研究成果の概要（英文）：In this project we explored the physics and mathematics of glass/jamming transitions which involves spin (rotational) degrees of freedom. We studied a broad range of systems: a frustrated magnet, colloidal glass, vectorial inference/constraint satisfaction problem, statistical physics theory of machine learning based on deep neural networks. We succeeded in uncovering the mechanism of spin-glass transition without quenched disorder in a pyrochlore oxide Y<sub>2</sub>Mo<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, derivation of the glass-jamming phase diagram of a colloidal glass, construction of the theory and algorithms for inference of vectorial variables with many components and construction and construction of a statistical physics theory for deep learning based on deep neural networks.

研究分野：統計力学・物性基礎論

キーワード：ガラス転移 ネットワーク ジャミング フラストレート磁性 コロイド 制約充足問題 統計的推定 ニューラルネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

近年、無限大次元で厳密になる構造ガラスの平均場理論が構築された (Parisi, G., Urbani, P. and Zamponi, F., 2020. Theory of simple glasses: exact solutions in infinite dimensions. Cambridge University Press). しかし、扱われているのは並進自由度のみであり、現実の分子液体のもつ回転自由度は考慮されていない。回転自由度を含めた理論の構築が求められていた。

物理において回転自由度として良く知られているのはスピン自由度である。スピングラスの平均場理論は 1980 年代には構築されていた。しかし、そこで主に扱われていたのは不純物など外的なランダムネスをもつ磁性体であった。上記の構造ガラスの場合、そのような外的なランダムネスはなく、自発的にアモルファスな固体状態 - ガラスが出現している。ハミルトニアン自体にランダムネスがなくても、スピンのガラス転移が起こりうるのかは、フラストレート磁性の分野で長く興味を持たれてきた未解決問題であった。その平均場理論を構築することが求められていた。本研究の準備研究の段階で得られた成果をまとめた Yoshino, H., 2018.

Disorder-free spin glass transitions and jamming in exactly solvable mean-field models. SciPost Physics, 4(6), p.040. において、多成分ベクトルスピン系のガラス・ジャミングが外的な乱れなしで起こることを平均場理論によって示していた。これをヒントに、現実のフラストレート磁性におけるガラス転移のメカニズムの解決に取り組む糸口が見えていた。

さらにスピングラスの統計力学は、情報統計力学と歴史的に深いつながりがある。上記の多成分ベクトルスピン系のガラス・ジャミング転移は、制約充足問題、統計的推定の新しいクラスの問題の開拓につながる可能性を示唆していた。

## 2. 研究の目的

ガラスの物理学はソフトマターから固体物理学、情報科学にまでまたがる学際的問題である。その中心課題であるガラス転移のメカニズムの同定は物理学における最難関問題の一つである。[P. W. Anderson, (1995)] 本研究ではスピン (多成分ベクトルで表される回転自由度) に注目しつつ、強い外的な乱れに誘引されて起こる通常のスピングラス転移とは本質的に異なる、スピンの自発的な新奇ガラス転移のメカニズムを解明する。このために、統計力学理論と数値シミュレーションによる包括的な研究を展開し、スピンのガラス転移を分野横断的に理論解析する。具体的には [A] 外的乱れのないフラストレートスピン系でのガラス転移のメカニズム解明、[B] 分子・コロイドにおける回転自由度の絡む新奇ガラス転移の発見と解析、さらに [C] 多成分ベクトル変数を自由度とする制約充足問題や情報推定などの新しい情報科学の問題の定式化とそこに潜むガラス転移、すなわち解探索が急激に困難化する現象の解析を行う。以上の知見を統合化し、背後に共通して存在する [D] 「ガラス転移の数理」を抽出する。

## 3. 研究の方法

本研究のベースになる理論的アイディアは、上記の準備研究 (H. Yoshino (2018)) にある。これは、ある一般化された多体相互作用する  $M$  成分ベクトルスピンモデルを新たに定式化し、平均場理論が厳密になる空間次元無限大極限  $d \rightarrow \infty$ 、成分数無限大極限  $M \rightarrow \infty$  でレプリカ法と呼ばれる統計力学の手法を用いて解析したものである。スピングラスモデルと異なり相互作用  $J_{ij}$  に一切ランダムネスを入れていない。その結果平均場理論において、不純物などの外的な乱れの助けなしに、「過冷却常磁性状態」からスピンのガラス転移が自発的に起こることを見出した。

本研究は、この準備研究を起点に、以下に記述される具体的な研究項目を、理論および数値シミュレーションによって行う。理論によって新たなガラス転移相図が発見されれば、数値シミュレーションによって検証することが可能であり、ガラス転移メカニズム解明にとって重要な戦略となる。計算資源は (1) 専用の模並列計算機クラスターを阪大サイバーメディアセンター内に新設、あわせて (2) 東大物性研究所、阪大サイバーメディアセンターのスーパーコンピュータを利用した。

### [A] フラストレート系におけるスピンのガラス転移

フラストレート磁性の舞台は、カゴメ格子やパイロクローア格子など、三角形や正四面体が頂点共有によってゆるやかに結合したネットワーク状の格子である。以下の 3 つの観点から研究を行った。

パイロクローア酸化物  $Y_2MO_2O_7$  におけるスピ・格子自由度の微視的解析と有効モデルの構築。

- ① 有効モデルの大規模モンテカルロシミュレーションによる数値解析
- ② 平均場理論の構築と解析

## [B] ソフトマター系でのスピン(回転)および並進自由度のガラス転移

一軸回転対称性を持つコロイド (パッチコロイド、楕円体コロイド)における、スピン(回転)および並進自由度のガラス転移、ジャミングに関して次の2つの観点からの研究を行った。

- ① 楕円体斥力コロイド、パッチコロイドの平均場理論の構築と解析
- ② ダンベル粒子系の大規模数値シミュレーションによる解析

## [C] ベクトル自由度の情報統計力学

準備研究の M 成分ベクトルスピン模型の平均場理論(H. Yoshino, 2018)をヒントに次の2つの観点からの研究を行った。

- ① 多成分ベクトルスピンの統計的推定問題の開拓 (レプリカ理論とキャビティ法の開発)
- ② 深層ニューラルネットワークにおける学習のレプリカ理論の構築と解析

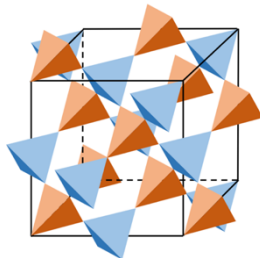
## [D] ガラス転移の数理構造

準備研究で考察した外的なランダムネスを持たない多成分ベクトルスピン系の一つの特徴は、全結合系よりも結合が少なく、いわゆる疎結合系よりも結合が多いことである。これを「密結合系」と呼ぶことにした。このクラスの系について、次の二つの観点からの研究を行った。

- ① この密結合系を、レプリカ理論、キャビティ法、動的平均場理論によって総合的に総合的に扱う枠組みの整備
- ② 複合自由度系の有効平均場スピン模型の構築と理論解析

## 4. 研究成果

### [A] フラストレート系におけるスピンのガラス転移

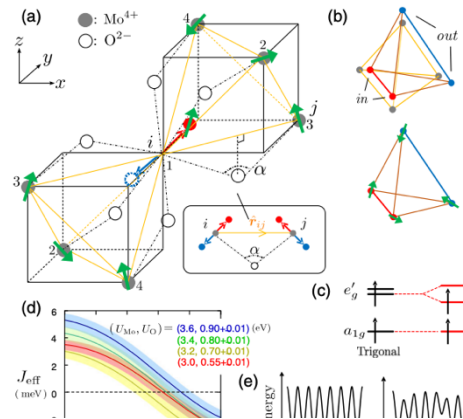


パイロクロア格子

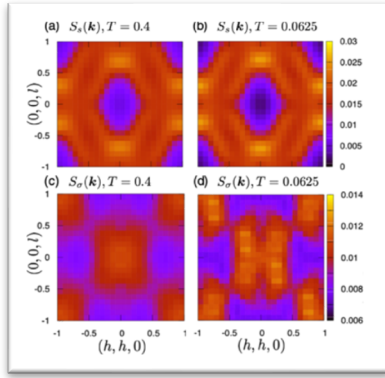
パイロクロア酸化物  $Y_2MO_2O_7$  において、不純物など外的な乱れなしに自発的にスピングラス転移が起こることが実験的に知られていた。我々は、最近の実験によって指摘されたある種のヤーンテラー効果によるものと見られる格子歪の重要性に着目し、微視的な理論解析を行った。その結果、パイロクロア格子を組んでいる Mo イオンの変位によって、これを取り巻く酸素イオンも変位し、その結果、Mo イオンのスピン間に働く酸素イオンを介した交換相互作用が、符号を替えるほどに大きく変化することを確認した。この結果に基づき、スピンだけでなく格子歪を動的自由度として取り入れた有効理論模型を提案した。(Mitsumoto-Hotta-Yoshino, "Spin-orbital glass

transition in a model frustrated pyrochlore magnet without quenched disorder", PRL 124, 087201 (2020)) この有効模型において、格子の歪みはいわゆる 2-in-2-out のアイスルールに従って歪むことを仮定している。これは上記の実験からの示唆に基づいている。なお、最近、この点についても微視的な基礎付けを行うためにヤーンテラー効果の微視的な理論解析を行なっている(プレプリント)Mitsumoto-Hotta-Yoshino, "Supercooled Jahn-Teller Ice", arXiv:2202.05513.

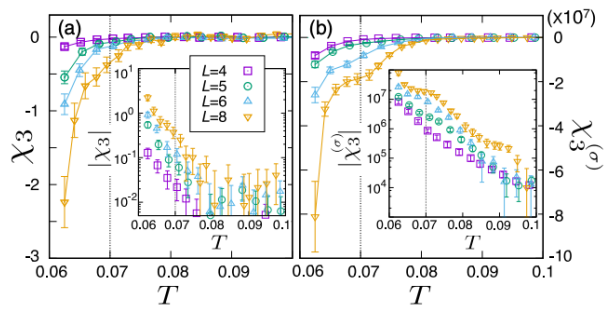
次にこの有効模型に関して大規模なモンテカルロシミュレーションを行い、統計力学的な解析を行なった。その結果、低温において、スピンと格子自由度が同時に凍結する2次転移を捉えることに成功した。具体的には、(i) この転移点に向かってスピンおよび格子自由度が発散的挙動を示すこと。(ii)非線形感受率(スピン、格子)が負に発散してゆく挙動を示すことがわかった。このとき、静的構造因子は高温から特に目立った変化を示すことなく、液体的に乱れた状態が凍結したガラス転移であることが強く示唆された。



(a) Mo イオンの変位 (b) 2-in-2-out ルール (c) 軌道縮退の解消 (d) 交換相互作用の Mo-O-Mo ボンド角度  $\alpha$  依存性 (e) エネルギー地形図



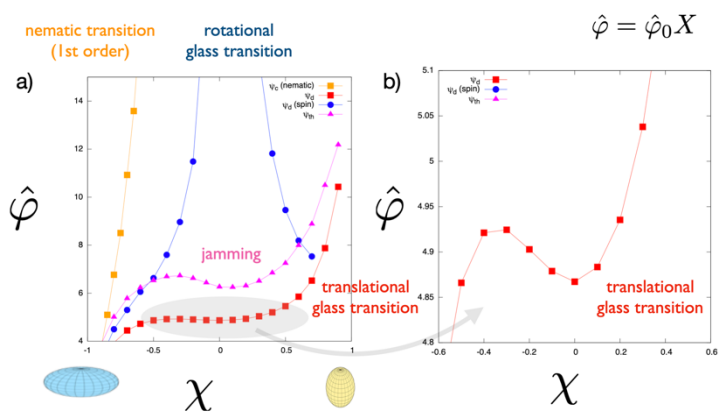
格子歪みの静的構造因子



非線形感受率 (a) スピン (b) 格子変位

[B] ソフトマター系でのスピン(回転)および並進自由度のガラス転移

1 軸異方性をもつ粒子系のガラス・ジャミング状態を解析する平均場理論を構成した。これは無限次元で厳密になるものである。具体的にこれを剛体楕円体コロイド系に適用し、ガラス・ジャミング相図を1段階のレプリカ対称性の破れの範囲で求めることができた。(Yoshino, in preparation) 異方性の弱い領域では、並進・回転自由度が分離したガラス転移を示しことがわかった。ガラス転移線、ジャミング線は異方性に対して非単調な振る舞いを示し、実験・シミュレーションで得られている結果と整合している。



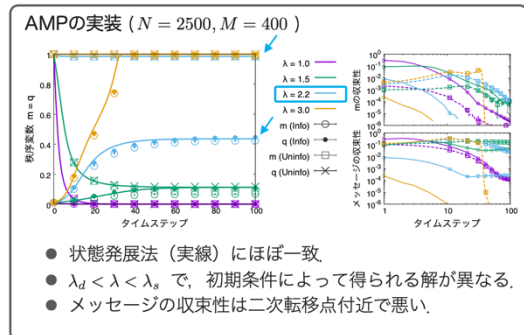
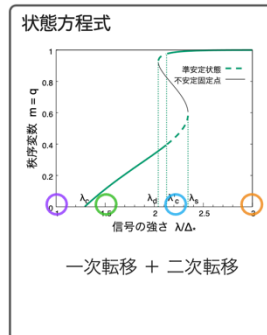
またダンベル粒子系のガラス状態における力学的特性、振動特性を解析し、ジャミング転移点付近で、並進・振動それぞれに起因する特徴的な振動スペクトルを得ることに成功した。(Shiraishi, Mizuno and Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. 89, 074603 (2020).)

[C] ベクトル自由度の情報統計力学

準備研究 Yoshino, H., 2018. Disorder-free spin glass transitions and jamming in exactly solvable mean-field models. SciPost Physics, 4(6), p.040. は、多成分ベクトルスピンのガラス・ジャミング転移を理論的に解析していた。これは情報統計力学の視点から見ると、グラフ彩色問題の連続版など、ベクトル自由度の制約充足問題、と捉えることができる。この逆問題として、多成分ベクトル変数の統計的推定の問題を一般的に構成し、理論・数値的研究を行った。これまでいわゆるベイズ最適な場合について、レプリカ理論を構成して統計的推定の理論性能を解析し、また Belief Propagation (BP) や, Approximate Message Passing (AMP) に基づく推定アルゴリズムの実装に成功した。

(Nagasawa, Yokoi, Obuchi, Yoshino, in preparation)

$p = 2, r = 0.8$  の場合

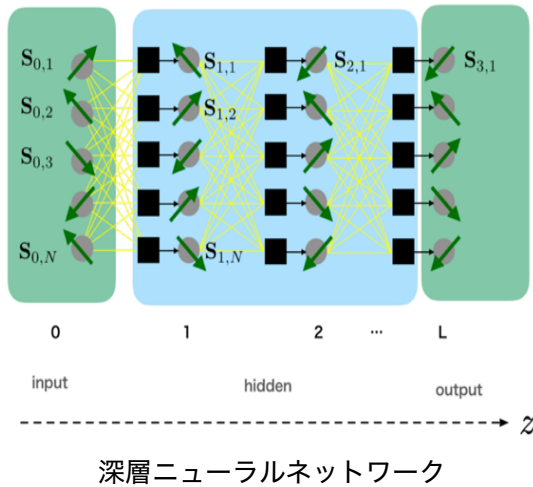


- 状態発展法 (実線) にほぼ一致
- $\lambda_d < \lambda < \lambda_s$  で、初期条件によって得られる解が異なる。
- メッセージの収束性は二次転移点付近で悪い。

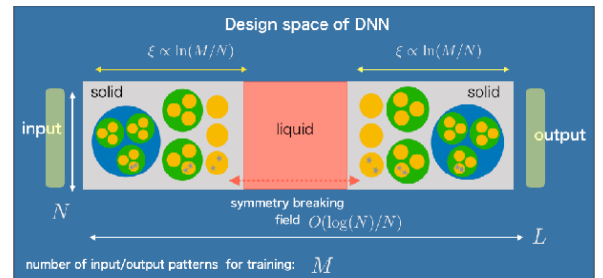
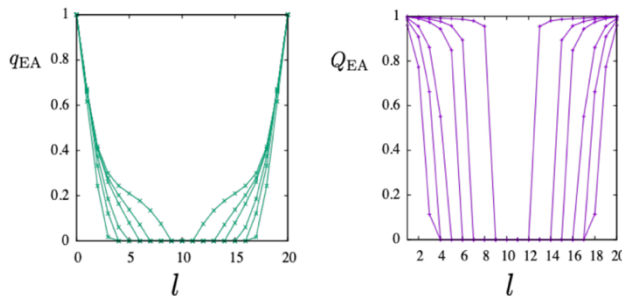
さらに、準備研究(H. Yoshino, 2018)をヒントに、これまで困難とされてきた深層ニューラルネットワークにおける学習の統計力学的解析が可能であることがわかり、レプリカ理論によ



る理論解析に成功した。(Yoshino, H., 2020. From complex to simple: hierarchical free-energy landscape renormalized in deep neural networks. *SciPost Physics Core*, 2(2), p.005.)



具体的には、(i)ランダムな入出力データを学習(ランダム制約充足問題)(ii)教師-生徒シナリオに基づく学習(統計的推定問題)の2つをレプリカ理論を構成して解析した。その結果どちらの場合も、学習データの増大とともに、入出力層の近傍ほど解空間の現象が顕著で、ガラス転移・結晶化転移に対応する現象が急速に進行するのに対し、中央付近では「遊び」が多く残されて液体状態にとどまることが明らかになった。



同じ訓練データで学習する複数のマシン(レプリカ)間重なり空間構造(左:ニューロンの発火パターン(スピンの重なり、右:シナプス結合の重なり)

深層ニューラルネットワークにおける学習の位相空間

## D] ガラス転移の数理構造

本研究では、並進・回転自由度のある粒子系、スピン・格子自由度のあるフラストレート系、ニューロン・シナプス結合のある深層ニューラルネットワークなど複合自由度の系を多く解析した。これらに共通する数理構造を捉えるための基本モデルとして、複合自由度のpスピンモデルを構築し、そのレプリカ理論解析、動的平均場理論解析を行った。(Yoshino, in preparation) また、疎結合と全結合の中間に位置する密結合系における、ガラス転移、ジャミング転移を包括的に議論する理論的枠組みを整備した。(Yoshino, in preparation)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yoshino Hajime	4. 巻 2
2. 論文標題 From complex to simple : hierarchical free-energy landscape renormalized in deep neural networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SciPost Physics Core	6. 最初と最後の頁 005 (1-56)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhysCore.2.2.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Jin Yuliang, Yoshino Hajime	4. 巻 118
2. 論文標題 A jamming plane of sphere packings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2021794118	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 -
1. 著者名 Mitsumoto Kota, Hotta Chisa, Yoshino Hajime	4. 巻 124
2. 論文標題 Spin-Orbital Glass Transition in a Model of a Frustrated Pyrochlore Magnet without Quenched Disorder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 087201 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.087201	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Ikeda Harukuni, Miyazaki Kunimasa, Yoshino Hajime, Ikeda Atushi	4. 巻 103
2. 論文標題 Multiple glass transitions and higher-order replica symmetry breaking of binary mixtures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 022613-(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.103.022613	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 -

1. 著者名 Hideyuki Mizuno, Masanari Shimada, and Atsushi Ikeda	4. 巻 2
2. 論文標題 Anharmonic properties of vibrational excitations in amorphous solids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013215(1-13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013215	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shimada Masanari, Mizuno Hideyuki, Berthier Ludovic, Ikeda Atsushi	4. 巻 101
2. 論文標題 Low-frequency vibrations of jammed packings in large spatial dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 052906(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.052906	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Kentaro Nagasawa, Kunimasa Miyazaki and Takeshi Kawasaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Classification of the reversible irreversible transitions in particle trajectories across the jamming transition point	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 7557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9SM01488H	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Obuchi Tomoyuki, Sakata Ayaka	4. 巻 52
2. 論文標題 Cross validation in sparse linear regression with piecewise continuous nonconvex penalties and its acceleration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. A: Math. Theor.	6. 最初と最後の頁 414003(1-30)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab3e89	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Obuchi Tomoyuki, Kabashima Yoshiyuki	4. 巻 20
2. 論文標題 Semi-Analytic Resampling in Lasso	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 1-33
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 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計42件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Hajime Yoshino
2. 発表標題 From complex glass to simple liquid : layering transitions in deep neural networks", 40 years of Replica Symmetry Breaking
3. 学会等名 40 years of Replica Symmetry Breaking (Sapienza University of Rome, Rome, Italy) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Yoshino
2. 発表標題 Replica theory on a deep neural network
3. 学会等名 The 5th East Asia Joint Seminars On Statistical Physics (Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Science, Beijing, China) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Yoshino
2. 発表標題 From complex to simple : hierarchical free-energy landscape renormalized in deep neral networks
3. 学会等名 Deep Learning and Physics 2019 (Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto Univ.) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Hajime Yoshino
2. 発表標題 Emergence and failure of rigidity in glasses : replicated liquid theory and simulations
3. 学会等名 2019 International Graduate Summer School on "Frontiers of Soft Matter and Amorphous Materials", Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuliang Jin and Hajime Yoshino
2. 発表標題 Extending the phase space of frictionless jamming from a jamming point to a jamming plane
3. 学会等名 10th International Conference on Packings, Yale University, New Haven, CT, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Ikeda
2. 発表標題 Anomalous extended and quasi-localized low frequency vibrations of jammed solids
3. 学会等名 2019 International Workshop on Glass Physics in Beijing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Ikeda
2. 発表標題 Connection between the Boson peak and quasi-localized modes in amorphous solids
3. 学会等名 25th International Congress on Glass (ICG 2019, Boston, U.S.A) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunimasa Miyazaki
2. 発表標題 Kinetic Theories of Supercooled Liquids and Glass Transitions
3. 学会等名 2019 International Graduate Summer School on "Frontiers of Soft Matter and Amorphous Materials", Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunimasa Miyazaki
2. 発表標題 Structures and Slow Dynamics of a Simple Active Matter Model
3. 学会等名 2019 International Workshop on Soft Matter and Biophysics Theories (SMTB2019, Beijing) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎州正
2. 発表標題 ガラス転移理論の最近の進展
3. 学会等名 日本物理学 (岐阜大学) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Obuchi Tomoyuki, Sakata Ayaka
2. 発表標題 Cross validation in sparse linear regression with piecewise continuous nonconvex penalties and its acceleration
3. 学会等名 2019 Workshop on Statistical Physics of Disordered Systems and Its Applications (SPDSA2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Obuchi Tomoyuki
2. 発表標題 Statistical mechanical analysis of sparse linear regression as a variable selection problem
3. 学会等名 2019 International Workshop on Glass Physics in Beijing (Institute of Theoretical Physics - Chinese Academy of Sciences (ITP-CAS), Beijing (招待講演) (国際学会))
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Obuchi Tomoyuki, Sakata Ayaka
2. 発表標題 Cross validation in sparse linear regression with piecewise continuous nonconvex penalties and its acceleration
3. 学会等名 Statistical Physics and Neural Computation (SPNC-2019) (Sun Yat-sen University, Guangzhou) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小淵 智之
2. 発表標題 高次元確率モデルの扱いについて：統計物理の視点から
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 (広島大) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小淵 智之
2. 発表標題 ボルツマンマシンによる神経細胞集団の有効な非対称結合推定
3. 学会等名 情報数物研究会 (東北大) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Mitsumoto, Chisa Hotta and Hajime Yoshino
2. 発表標題 Simultaneous spin and orbital glass transitions in a model frustrated pyrochlore magnet without quenched disorder
3. 学会等名 2019 International Workshop on Glass Physics in Beijing, Beijing, China (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Mitsumoto, Chisa Hotta and Hajime Yoshino
2. 発表標題 Spin-glass transition without quenched randomness in a dynamically distorted pyrochlore magnet
3. 学会等名 Frontiers of statistical physics 2019, Univ. of Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Mitsumoto, Chisa Hotta and Hajime Yoshino
2. 発表標題 Simultaneous spin and orbital glass transitions in a model frustrated pyrochlore magnet without quenched disorder
3. 学会等名 Computational Approaches to Quantum Many-body Problems, ISSP Univ. of Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野元
2. 発表標題 楢円コロイドにおけるガラス転移とネマティック転移の平均場理論
3. 学会等名 ソフトマター研究会 (名古屋大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 光元亨汰, 吉野元
2. 発表標題 ランダムネスを含まないフラストレート磁性体におけるスピングラス転移の平均場理論
3. 学会等名 日本物理学会 (岐阜大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長澤莉希, 小淵智之, 吉野元
2. 発表標題 1+p体観測による多成分ベクトルの統計的推定
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野元
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークによる学習のメカニズム: レプリカ理論とシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 倉橋拓良, Yuliang Jin, 吉野元, 川崎猛史, 宮崎州正
2. 発表標題 熱的アニールを施したジャミング系のせん断応答
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島田真成, Daniele Coslovich, 水野英如, 池田昌司
2. 発表標題 ガラスのポテンシャルエネルギー地形における鞍点配置の振動特性
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大山倫弘, 水野英如, 池田昌司
2. 発表標題 非平衡流動化ガラスの限界安定性に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西川宜彦, 池田昌司, Ludovic Berthie
2. 発表標題 ジャミング転移点近傍における緩和時間の発散の空間次元依存性
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原雄介, 水野英如, 池田昌司
2. 発表標題 粒径の大きく異なる二成分系のジャミング転移
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 島田真成, 水野英如, Ludovic Berthier, 池田昌司
2. 発表標題 高次元ジャミング系の低周波数振動
3. 学会等名 第9回ソフトマター研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山玄德, 池田昌司
2. 発表標題 競合する相互作用を持つ系のゲル状態とガラス状態の違いについて
3. 学会等名 日本物理学会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥裕理, 池田昌司, 高江恭平
2. 発表標題 分子シミュレーションによる高密度流体の相分離の研究
3. 学会等名 日本物理学会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大山倫弘, 水野英如, 池田昌司
2. 発表標題 アモルファス固体の振動モードと塑性変形ダイナミクスの関係
3. 学会等名 日本物理学会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白石薫平, 水野英如, 池田昌司
2. 発表標題 ダイマー粒子系の低周波数局在振動
3. 学会等名 日本物理学会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松山洋道, 游夏, 川崎猛史, 宮崎州正
2. 発表標題 一般化されたActive Ornstein-Uhlenbeck粒子系におけるHyperuniformity
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川崎猛史, 宮崎州正
2. 発表標題 機械的強化を施した高密度分散系におけるジャミング転移と力学応答
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今村桃太, 川崎猛史, 宮崎州正
2. 発表標題 Jamming転移点近傍の高密度分散系における可逆・不可逆転移とレオロジーの関係
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 葉章廷, 尾澤岬, 宮崎州正, 川崎猛史, Ludovic Berthier
2. 発表標題 Understanding the Difference between Shear-Banding of Amorphous Solids under Oscillatory and Simple Shear
3. 学会等名 日本物理学会 (名古屋大)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松山 洋道, 游 夏, 川崎 猛史, 宮崎 州正
2. 発表標題 一般化されたActive Ornstein-Uhlenbeck ParticleにおけるHyperuniformity
3. 学会等名 第9回ソフトマター研究会 (名古屋大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉橋 拓良, Yuliang Jin, 吉野 元, 川崎 猛史, 宮崎 州正
2. 発表標題 熱的アニールを施したジャミング系のせん断応答
3. 学会等名 第9回ソフトマター研究会 (名古屋大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野 嘉己, 川崎 猛史, 宮崎 州正
2. 発表標題 アクティブマターのガラス転移
3. 学会等名 第9回ソフトマター研究会 (名古屋大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎猛史, 宮崎州正
2. 発表標題 機械的アニールを施した高密度粒子系におけるShear JammingとShear Melting
3. 学会等名 日本物理学会 (岐阜大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 葉章廷, 尾澤岬, 宮崎州正, 川崎猛史, Berthier Ludovic
2. 発表標題 Effect of Mechanical and Thermal Annealing on Yielding of Cyclically Deformed Amorphous Solids
3. 学会等名 日本物理学会 (岐阜大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野嘉己, 川崎猛史, 宮崎州正
2. 発表標題 アクティブマターのガラス転移と動的不均一性II
3. 学会等名 日本物理学会 (岐阜大)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>乱れない固体結晶で電子スピンのガラス化する機構を理論的に解明  <a href="https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20200221_1">https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20200221_1</a>          吉野 元HP - 研究トピックス  <a href="http://www.cp.cmc.osaka-u.ac.jp/~yoshino/topics.html">http://www.cp.cmc.osaka-u.ac.jp/~yoshino/topics.html</a></p>
---

## 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
研究分担者	池田 昌司  (Ikeda Atsushi)  (00731556)	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授    (12601)	
研究分担者	金 鋼  (Kim Kang)  (20442527)	大阪大学・基礎工学研究科・准教授    (14401)	
研究分担者	宮崎 州正  (Miyazaki Kunimasa)  (40449913)	名古屋大学・理学研究科・教授    (13901)	
研究分担者	小淵 智之  (Obuchi Tomoyuki)  (40588448)	京都大学・情報学研究科・准教授    (14301)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関