

統計物理学研究室

1. メンバー

教授：根本 幸児	011-706-3441	nemoto@statphys.sci.hokudai.ac.jp
教授：北 孝文	011-706-2687	kita@phys.sci.hokudai.ac.jp
准教授：速水 賢	011-706-2694	hayami@phys.sci.hokudai.ac.jp
助教：奥田 浩司	011-706-3442	okuda@statphys.sci.hokudai.ac.jp

研究員：桐越 研光

DC2：渡部 風太

MC2：瀧口 由宇

MC1：長浜 康峻

MC1：印田 朱音

MC1：Sher Baz

B4：小林 秀太

B4：須川 翔太

MC2：小峰 啓吾

MC1：若月 奎人

MC1：山越 鍛

B4：中林 拓紀

B4：高須 湧雅

MC2：村田 智幸

MC1：新村 登子

MC1：神田 修平

B4：矢口 真那斗

B4：JANG JUHWAN

2. 研究成果

根本 幸児：

ネットワーク上の多体相互作用系としての公共財ゲームの相転移

「人はなぜ協力するのか」「人はなぜ利他的に行動しうするのか」—この基本的な問いに対して、ゲーム理論の枠組みを用いた研究が経済学、社会学、数理生物学等の諸分野で行われてきた。特に 90 年代以降、ゲーム理論モデルにネットワーク構造を導入し、つながりが協力行動の促進にもたらす効果を調べる研究が進められてきた。ネットワーク上の公共財ゲームは、人間社会で観察されるグループでの協力を抽象化したゲーム理論モデルである。ネットワーク上のノードは人に対応しており、それぞれ「協力」「裏切り」とラベリングされた状態(戦略)をとる。各ノードは、同じグループに属する近接ノードの状態の組み合わせに応じて利得を得る。そして、自身の利得がより大きくなるよう戦略を更新する。ネットワーク上の公共財ゲームは、統計物理学におけるスピンモデルの一種と見なすことができる。このモデルはパラメータに応じて、全ノードが「協力」あるいは「裏切り」戦略をとる吸収状態と、両戦略が共存する非平衡定常状態をとる。非平衡相転移を示す数理モデルとして、このモデルは統計物理学の分野でも研究が進められてきた。

現状におけるネットワーク上の公共財ゲーム研究の課題は、理論的な解析手法の欠落に

よりダイナミクスや転移点を数式で表現することができないことである。これは、このモデルが多体相互作用をもつことに由来する。以下の理由から、平均場近似やペア近似といった従来の近似手法を用いることができない。平均場近似では相互作用の不均質性を表現できず、ネットワーク構造が協力に与える影響を分析できない。また、相互作用に関わるノードの多さから、二体相互作用の分析に用いられてきたペア近似の適用は困難である。そのため、先行研究では乱数を用いた数値計算手法であるモンテカルロ (MC) シミュレーションが用いられてきた。しかし、この従来手法では転移点が数値的にしか分からず、モデルの数理構造がブラックボックスになる。ネットワークのどのような特徴が協力行動の促進するのかを理解するためには、ネットワーク上の公共財ゲームを理論的に解析できる新たな研究手法を開発し、このモデルの相転移の性質を明らかにしなければならない。

M2の瀧口君は、ネットワーク上のイジングモデルや感染症モデルを解析するために近年提案されたApproximate Master Equation (AME) 法を拡張して用い、公共財ゲームのダイナミクスを連立常微分方程式で記述した。この近似手法は最近接ノードの状態まで考慮するため、平均場近似やペア近似よりも近似の精度が高いことが特徴である。AME法は高精度である一方で、近似がネットワークのランダム性に基づいていることもあり、公共財ゲームのような多体相互作用系にも拡張可能である。AME法を拡張することでネットワーク上の公共財ゲームを理論的に解析する方法を提供し、このモデルを統計物理学の枠組みで分析することが可能になると期待される。

北 孝文:

ボーズ・アインシュタイン凝縮相の揺らぎ交換近似

相互作用する凝縮ボーズ粒子系について、密度などの揺らぎの効果を取り込んだ「揺らぎ交換近似 (Fluctuation Exchange Approximation、略してFLEX近似) を構成した。FLEX近似は、フェルミ粒子系の銅酸化物高温超伝導体の性質を理解するために開発された。そして、転移温度 T_c の定量的計算や、スピン揺らぎや密度揺らぎが電気伝導度などの物理量に及ぼす影響を解明するのに大きな役割を果たしてきた。この近似法を、ボーズ・アインシュタイン凝縮が起こったボーズ粒子系に拡張することに成功した。一般に、超伝導や強磁性などの秩序相を記述するには、グリーン関数と秩序変数を自己無撞着に計算する必要がある。これは、自発的対称性の破れを記述するには、秩序変数を非線形方程式で決める必要があるためである。しかし、ボーズ・アインシュタイン凝縮相については、秩序変数である凝縮波動関数がボーズ場そのものの期待値として現れるため、意味のある自己無撞着理論を構成することには大きな困難があることが明らかになっていた。この論文では、正常相の自己無撞着理論であるラティンジャー・ワードの自由エネルギー汎関数を、凝縮波動関数が出現する場合に拡張し、かつ、ゼロから連続的に立ち上がる励起エネルギーを持つように、すなわち、ゴールドストーンの定理と整合するように構成することに成功した。

グリーン関数に対するダイソン方程式や凝縮波動関数を決定する方程式は、この汎関数についての停留条件により導くことができる。新たに導出された方程式は、平均場理論を超えた相関効果が、凝縮ボーズ粒子系の性質にどのような影響を及ぼすのか、その理論的解明に大きく寄与することが期待できる [T. Kita, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 104401 (2023)]。

速水 賢：

光照射を用いた多極子秩序制御

電磁場は、物質の電氣的・磁氣的性質を調べるために用いられる基本的な外場である。微視的な観点からは、電磁場は電気双極子モーメントおよび磁気双極子モーメントに結合している。一方最近になって、磁気トロイダル多極子モーメントや電気トロイダル多極子モーメントといった新しい多極子モーメントに関する物性が盛んに研究されるようになってきた。例えば、空間反転対称性と鏡映対称性の両方がないもとで現れるキラリティの微視的起源は、電気トロイダル単極子モーメントの発現に対応し、空間反転対称性と鏡映対称性の両方が破れたもとで現れる線形電気磁気効果の微視的起源は、磁気トロイダル双極子モーメントの発現に対応している。しかしながら、こうした多極子モーメントに結合する単純な静的共役場は存在しないため、化学組成や格子構造によって「偶然」に現れるのが普通であった。我々は、電磁波を用いて様々な物質の量子状態や物理現象を誘起し、制御する方法を理論的に調べた。その際、フロッケ理論および数値シミュレーションを用いた解析を行うことで、従来の静的な電磁場では困難な多極子制御の可能性を理論的に示した。 [S. Hayami, R. Yambe, and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 043702 (2024)]

奥田浩司：

非平衡現象の理論的研究として、変化の不可逆性を特徴づけるエントロピー生成の下限の研究を、D2 学生の渡部君とともにおこなった。熱力学系の2つの状態間の変化はいつも可逆でおこなえる訳ではなく、不可逆にしかおこなえないときには変化に際しエントロピー生成が伴うこととなり、簡単な系の場合には2つの状態に依存したエントロピー生成の下限を計算することができることがある。

そのような系の1つに1粒子 overdamped Langevin 系があり、エントロピー生成の下限が2つの状態間の Wasserstein 距離と呼ばれる量で表されることが分かっている。そこで我々はその結果をより一般的な場合に拡張すべく、1粒子 underdamped Langevin 系でのエントロピー生成の下限を求めるための研究をおこなっている。変化の経路をガウス分布の場合に限る（ポテンシャルを2次に限る）というような単純化も試みているが、まだ明確な結果は得られていない。

3. 成果発表（レフェリー制のあるジャーナルには * 印を付ける）

<原著論文>

1. T. Kita, " *How Infrared Singularities Affect Nambu-Goldstone Bosons at Finite Temperatures*" , *J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 054004 (2023).
2. T. Kita, " *Fluctuation Exchange Approximation for Bose-Einstein Condensates*" , *J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 104401 (2023).
3. A. Kirikoshi and S. Hayami, " *Microscopic mechanism for intrinsic nonlinear anomalous Hall conductivity in noncollinear antiferromagnetic metals*" , *Phys. Rev. B **107**, 155109 (2023)
4. R. Yambe and S. Hayami, " *Anisotropic spin model and multiple- Q states in cubic systems*" , * Phys. Rev. B **107**, 174408 (2023)
5. H. Kusunose, R. Oiwa, and S. Hayami, " *Symmetry-adapted modeling for molecules and crystals*" , * Phys. Rev. B **107**, 195118 (2023)
6. S. Hayami and R. Yambe, " *Field direction dependent skyrmion crystals in noncentrosymmetric cubic magnets: A comparison between point groups (O, T) and Td* " , *Phys. Rev. B **107**, 174435 (2023)
7. S. Hayami, " *Antiferro Skyrmion Crystal Phases in a Synthetic Bilayer Antiferromagnet under an In-Plane Magnetic Field*" , * J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 084702 (2023)
8. S. Hayami and Y. Kato, " *Magnetic bubble crystal in tetragonal magnets*" , *Phys. Rev. B **108**, 024426 (2023)
9. R. Yambe and S. Hayami, " *Symmetry analysis of light-induced magnetic interactions via Floquet engineering*" , *Phys. Rev. B **108**, 064420 (2023)
10. S. Hayami, R. Oiwa, and H. Kusunose, " *Unconventional Hall effect and magnetoresistance induced by metallic ferroaxial ordering*" , *Phys. Rev. B **108**, 085124 (2023)

11. S. Hayami,
“Chern insulating state with double- Q ordering wave vectors at the Brillouin zone boundary” ,
*Phys. Rev. B **108**, 094416 (2023)
12. S. Hayami,
“Uniform and staggered electric axial moment in a zigzag chain” ,
* Phys. Rev. B **108**, 094106 (2023)
13. S. Hayami,
“Checkerboard bubble lattice formed by octuple-period quadruple- Q spin density waves” ,
*Phys. Rev. B **108**, 094415 (2023)
14. S. Hayami and H. Kusunose,
“Time-reversal switching responses in antiferromagnets” ,
* Phys. Rev. B **108**, L140409 (2023)
15. S. Hayami and H. Kusunose,
“Chiral Charge as Hidden Order Parameter in URu_2Si_2 ” ,
* J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 113704 (2023)
16. A. Kirikoshi and S. Hayami,
“Rotational Response Induced by Electric Toroidal Dipole” ,
* J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 123703 (2023)
17. S. Hayami and K. Hattori,
“Multiple- q Dipole-Quadrupole Instability in Spin-1 Triangular-Lattice Systems” ,
* J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 124709 (2023)
18. D. Singh, Y. Fujishiro, S. Hayami, S. H. Moody, T. Nomoto, P. R. Baral, V. Ukleev, R. Cubitt, N.-J. Steinke, D. J. Gawryluk, E. Pomjakushina, Y. Onuki, R. Arita, Y. Tokura, N. Kanazawa, and J. S. White,
“Transition between distinct hybrid skyrmion textures through their hexagonal-to-square crystal transformation in a polar magnet” ,
* Nat. Commun. **14**, 8050 (2023)
19. S. Hayami,
“Three-sublattice antiferro-type and ferri-type skyrmion crystals in magnets without the Dzyaloshinskii-Moriya interaction” ,
* Phys. Rev. B **109**, 014415 (2024)
20. S. Hayami,
“Hybrid skyrmion and anti-skyrmion phases in polar $C4v$ systems” ,

- * Phys. Rev. B **109**, 054422 (2024)
21. R. Yambe and S. Hayami,
“*Scalar spin chirality induced by a circularly polarized electric field in a classical kagome magnet*” ,
* Phys. Rev. B **109**, 064428 (2024)
22. S. Hayami, R. Yambe, and H. Kusunose,
“*Analysis of Photo-Induced Chirality and Magnetic Toroidal Moment Based on Floquet Formalism*” ,
* J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 043702 (2024)
23. S. Hayami,
“*Effect of in-plane magnetic field on skyrmions in a centrosymmetric triangular-lattice system with symmetric anisotropic exchange interaction*” ,
* Magnetism **4**, 54-72 (2024)

<会議抄録等>

<著書>

《単著》

北 孝文「理解しよう 熱・統計力学」(数理工学社, 2023年4月)

《共著》

《編著》

4-1. 学術講演(国際学会・国際シンポジウム)(発表者に * 印を付ける)(開催年月日を入れる)

<基調講演>

<招待講演>

<一般講演>

《口頭発表》

1.

《ポスター発表》

1. A. Inda, H. Kusunose, H. Yamamoto, and S. Hayami, “Quantification of chirality based on electric toroidal monopole”, MRM 2023, Kyoto, Japan (12/11-16 2023)
2. R. Yambe and S. Hayami, “Symmetry analysis of light-induced magnetic interactions via Floquet engineering”, Trends in MAGnetism 2023, Rome, Italy (9/4-8 2023)
3. K. Okigami, R. Yambe, and S. Hayami, “Engineering a Skyrmion Crystal in

Ferromagnetic/Antiferromagnetic Bilayers Based on Magnetic Frustration Mechanism”, Topological Matter School 2023, Donostia-San Sebastián, Spain (8/20-25 2023)

4. A. Kirikoshi and S. Hayami, “Classification of Superconductivity in Multiorbital Systems by Multipoles”, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023, Hokkaido University, Hokkaido, Japan (8/8-10 2023)
5. A. Inda and S. Hayami, “Third-order transverse magnetic susceptibility under ferro-axial ordering”, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023, Hokkaido University, Hokkaido, Japan (8/8-10 2023)
6. R. Yambe and S. Hayami, “Floquet engineering of magnetic interactions: Understanding based on the crystal symmetry lowering”, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023, Hokkaido University, Hokkaido, Japan (8/8-10 2023)
7. R. Yambe and S. Hayami, “Sublattice-dependent Skyrmion Crystals by Itinerant Frustration”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023, Songdo ConvensiA, Incheon, Korea (7/2-7 2023)
8. S. Okumura, 笠ヲS. Hayami, Y. Kato, and Y. Motome, “Magnetic Hedgehog Lattices in Itinerant Magnets”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023, Songdo ConvensiA, Incheon, Korea (7/2-7 2023)

4-2. 学術講演（国内学会・国内その他）（発表者に * 印を付ける）

<招待講演>

1. 瀧口由宇, Approximate Master Equation を用いたネットワーク上の公共財ゲームの解析, 第 18 回水戸数学情報数理セミナー, 茨城大学, 2023 年 7 月.
2. 速水 賢, “反強磁性体による創発スピン軌道物性”, 2023 年度 第 2 回スピントロニクス研究会, エクシブ鳥羽
3. 速水 賢, “相関電子系に対する多極子表現論の構築と交差相関応答への適用”, 第 17 回シンポジウム「物性科学領域横断研究会」記念講演, 名古屋工業大学, 愛知県
4. 速水 賢, “機能性トポロジカル磁性体の理論物質設計”, シンポジウム「トポロジカルデバイスの現在と未来」, オンライン開催 (10/2-3 2023)
5. 速水 賢, “対称性適合多極子基底を用いた新規物性開拓: スピン分裂・非相反伝導・フェロアキシャル秩序”, 金研研究会 強相関物質における創発物性研究の現状と将来展望, 東北大学, 宮城県 (4/22-23 2023)

<一般講演>

《口頭発表》

1. 瀧口由宇, 根本幸児, ネットワーク上の公共財ゲームの AME 法を用いた解析, 日本物理学会 第 78 回年次大会, 講演番号 16pC206-1, 東北大学, 2023 年 9 月
2. 速水 賢, "Representation of electronic order parameters breaking spatial inversion, time-reversal or gauge symmetries", 令和 5 年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 東京大学物性研究所, 千葉県 (12/26-28 2023)
3. 速水 賢, "対称性適合多極子基底を用いたアシンメトリ量子物性の表現", 学術変革領域研究 (A)「アシンメトリ量子」キックオフミーティング, 岡山大学 (6/10-11 2023)
4. 桐越 研光, 速水 賢, "フェロアキシシャル秩序下における非線形磁気歪み応" 日本物理学会 2024 年春季大会
5. 沖上 和希, 速水 賢, "機械学習を用いたトポロジカルスピン秩序探索: 正方スキルミオン結晶の新しい安定化機構" 日本物理学会 2024 年春季大会
6. 印田 朱音, 大岩 陸人, 楠瀬 博明, 山本 浩史, 速水 賢, "キラリ化メタン分子の電気トロイダル単極子による解析" 日本物理学会 2024 年春季大会
7. 大岩 陸人, 印田 朱音, 速水 賢, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 楠瀬 博明, "多極子基底を用いた対称性適合Closestワニエ模型の構築" 日本物理学会 2024 年春季大会
8. 奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年, "反転対称な系において異方的相互作用がもたらす多彩な磁気ヘッジホッグ格子相とスピンスカラーカイラリティ" 日本物理学会 2024 年春季大会
9. 山家 椋太, 速水 賢, "円偏光電場によるスキルミオン結晶の安定化とトポロジーの制御" 日本物理学会 2024 年春季大会
10. Y. Dong, Y. Kinohsita, M. Ochi, R. Nakachi, R. Higashinaka, S. Hayami, Y. Wan, Y. Arai, S. Huh, M. Hashimoto, D. Lu, M. Tokunaga, Y. Aoki, T. D. Matsuda, T. Kondo, "Magnetic-domain-dependent pseudogap induced by Fermi surface nesting in GdRu₂Si₂" 日本物理学会 2024 年春季大会
11. 松山 直史, 野村 肇宏, 速水 賢, 加藤 康之, 吉持 遥人, Nguyen Duy Khanh, 高木 里奈, 十倉 好紀, 関 真一郎, 小濱 芳允, "空間反転対称な正方晶スキルミオンホスト GdRu₂(Si, Ge)₂ における新規相の発見と磁性の考察", 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 宮城
12. 吉持 遥人, 高木 里奈, Nguyen Duy Khanh, 速水 賢, 関 真一郎, "空間反転対称な正方晶スキルミオン物質 GdRu₂Ge₂ における磁気相図の磁場角度依存性", 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 宮城
13. 筒井 智嗣, 花手 洋樹, 本田 孝志, 速水 賢, 永澤 延元, 依田 芳卓, 松平 和之, "Ca₅Ir₃O₁₂ のメスバウアー分光と中性子回折", 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 宮城

14. 印田 朱音, 速水 賢, “電気トロイダル双極子秩序下における磁気不安定性”, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 宮城
15. 桐越 研光, 速水 賢, “多極子基底による超伝導ギャップの対称性の分類”, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 宮城
16. 山家 椋太, 速水 賢, “レーザー誘起磁気相互作用による非共面磁気構造の安定化”, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 宮城
17. 友田 七海, 藤澤 唯太, 速水 賢, B. R. M. Smith, 中村 友謙, 岡田 佳憲, “TbTe₃ の反強磁性相における新しいCDW秩序の観測”, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 宮城

《ポスター発表》

1. 瀧口由宇, 根本幸児, レギュラーランダムグラフ上の自己相互作用を含む囚人のジレンマゲームの相図と転移点, 第 18 回ネットワーク生態学シンポジウム, 番号 P16, 北海道大学, 2023 年 3 月.
 2. 瀧口由宇, 根本幸児, 公共財ゲームの approximate master equation を用いた解析, ネットワーク科学研究会 2023, 講演番号 39, 同志社大学, 2023 年 12 月.
 3. 神田修平, 速水賢, “カイラルな結晶構造に特有の非線形光学応答” 日本物理学会 2024 年春季大会
 4. 大岩 陸人, 印田 朱音, 速水 賢, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 楠瀬 博明, “Symmetry-adapted closest Wannier tight-binding models”, 令和 5 年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 東京大学物性研究所, 千葉県 (12/26-28 2023)
 5. 奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年, “Effects of Q-dependent Anisotropy on Magnetic Hedgehog Lattices in Centrosymmetric Systems”, 令和 5 年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 東京大学物性研究所, 千葉県 (12/26-28 2023)
 6. 印田 朱音, 速水 賢, “フェロアキシシャル秩序相における非線形横磁化率”, 学術変革領域研究(A)「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」トピカルミーティング, 北海道大学, 北海道 (8/30-31 2023)
 7. 桐越 研光, 速水 賢, “Rotational Response Induced by Electric Toroidal Dipole”, 学術変革領域研究(A)「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」トピカルミーティング, 北海道大学, 北海道 (8/30-31 2023)
 8. 渡部風太*, 奥田浩司 「underdamped Langevin系におけるエントロピー生成率の下限」日本物理学会 2023 年秋期大会 (東北大学, 2023 年 9 月 16 日-19 日) 講演番号 17pPSA-82
5. 国際学会および国際シンポジウムの組織で (開催年月日を入れる)

<主催（委員長）>

<組織・運営委員>

<座長>

6. 在外研究

7. 科研費、助成金等の取得状況

北 孝文

1. 「超流動相における異常長距離相関の理論的研究」科学研究費補助金基盤研究(C)（一般）（2019年～2024年）

速水 賢

1. 「らせん構造に立脚した新規トポロジカル磁性体の理論的研究」国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」領域（2020～2023年度）
2. 「拡張多極子による交差相関物性・量子伝導の系統的理解と機能物質探索への展開」科学研究費補助金 基盤研究（B）（2021～2024年度）
3. 「時間・空間反転およびゲージ対称性の破れを伴う電子液晶相の研究」科学研究費補助金 新学術領域研究（研究領域提案型）「量子液晶の物性科学」公募研究（2022～2023年度）
4. 「スピン軌道結合系イリジウム酸化物の逐次新奇相転移と電流誘起交差相関物性の解明」科学研究費補助金 基盤研究（B）（2022～2025年度）、研究代表者：松平 和之 教授（九州工業大学）
5. 「中性子散乱による量子磁性研究の新展開」科学研究費補助金 基盤研究（A）（2022～2026年度）、研究代表者：佐藤 卓 教授（東北大学）
6. 「電気トロイダル単極子によるカイラル物質の特性解明と外場制御」科学研究費補助金 基盤研究（C）（2023～2025年度）、研究代表者：楠瀬 博明 教授（明治大学）
7. 「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」科学研究費補助金 学術変革領域研究(A) 計画研究（2023～2027年度）、研究代表者：大槻 純也 准教授（岡山大学）
8. 「第三の磁性体「Altermagnet」の物質設計と機能開拓」国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業（JST CREST）未踏探索空間における革新的物質の開発（2023～2028年度）、研究代表者：関 真一郎 准教授（東京大学）

8. その他

1. 速水賢：第18回凝縮系科学賞 「相関電子系に対する多極子表現論の構築と交差相関応答への適用」（11/24/2023）