

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01158

研究課題名(和文) 高次元データの次元圧縮によって実現する磁性と超伝導の第一原理計算

研究課題名(英文) Realization of first-principles calculations of magnetism and superconductivity by compression of high-dimensional data

研究代表者

大槻 純也(Otsuki, Junya)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授

研究者番号：60513877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：強相関電子系化合物では、多数の電子がクーロン斥力によって強く相互作用しあうことで、磁性や超伝導などの実用的に有用な様々な機能物性が発現する。それらの物性を理解する上で、外場への応答を表す感受率が重要な役割を果たす。しかし、現実の強相関化合物に対する感受率の計算は、数値計算の難しさのために実現していない。本研究では、データ科学的な方法論を応用することで、強相関化合物の感受率計算の実現に向けた多くの進展を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

静的な外場に対応する感受率は、材料としての性能そのものを表し、また、磁性や超伝導状態への相転移温度の決定にも利用される。一方、動的な外場に対応する感受率によって物質の励起構造を調べることができる。このように、静的および動的感受率は基礎・応用共に極めて重要な物理量であるが、多くの有用な機能物質を有する強相関電子系化合物の感受率計算は困難であった。本研究成果はこれを可能とするもので、今後、現実の機能物質の研究に応用されていくと期待される。

研究成果の概要(英文)：Strongly correlated electron compounds offers various practically useful functionalities such as magnetism and superconductivity. The susceptibility represents the response to an external field, and plays an important role in understanding their physical properties. However, calculations of the susceptibility for realistic strongly correlated compounds have not been realized due to the difficulty in numerical calculations. Applying data science approaches, this project has achieved important progress toward the realization of susceptibility calculations for strongly correlated compounds.

研究分野：物性理論

キーワード：強相関電子系 磁性 超伝導 第一原理計算 スペースモデリング

## 1. 研究開始当初の背景

強相関電子系においては、多数の電子がクーロン斥力によって強く相互作用しあうことで、高温超伝導や巨大磁気抵抗など、実用的に有用な様々な機能物性が発現する。磁性や超伝導などの機能物性を理解する上で、外場への応答を表す感受率が重要な役割を果たす。静的な外場に対応する感受率は、材料としての性能そのもの（例えば磁気抵抗）を表し、また、磁性や超伝導状態への相転移温度の決定にも利用される。一方、動的な外場に対応する感受率（例えば磁気励起スペクトル）によって物質の励起構造を調べることができる。このように、静的および動的感受率の計算は物質科学にとって極めて重要な課題であるが、多くの理論研究は、現実的な原子構造や軌道自由度などを考慮しない、単純化された有効模型を用いた定性的な議論が中心である。

この10年程の間に、密度汎関数理論 (DFT) に基づく第一原理計算と動的平均場理論 (DMFT) などの強相関モデル計算手法の融合が進んでおり、現実的な結晶構造や複雑な相互作用を考慮した上で感受率を計算するための基礎が発展してきている。この融合の流れで最も成功を収めている DFT+DMFT 法と呼ばれる計算手法により、角度分解光電子分光によって調べられる一粒子励起スペクトルの定量的な計算が可能になってきている。この DFT+DMFT 法を二粒子応答 (静的・動的感受率) の計算に応用できれば、磁性や超伝導の第一原理計算に向けた大きな進展となるが、数値計算の難しさのために実現していない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、多体電子状態の計算において成功を収めている DFT+DMFT 法を用いた静的および動的感受率の第一原理計算を実現し、強相関化合物における磁性と超伝導および動的応答の定量的な議論を可能とすることである。そのための必要ステップとして、典型的な強相関物質の相転移と動的応答スペクトルを再現することが最初の目標である。

## 3. 研究の方法

DFT+DMFT 法によって現実の物質に沿った感受率計算を行うには、軌道・原子・振動数など複数の自由度を持つ高次元データ (グリーン関数) を扱う。それに必要なメモリと計算量は、これら自由度の数に対して急速に増大するため、最先端の並列計算機でも取り扱えない。そのため、革新的な計算技術の開発無しには、この課題の実現は不可能な状況である。

本研究プロジェクトでは、これまでの量子多体計算や第一原理的計算における従来の取り組みだけでなく、データ科学的なアプローチを試みる。本プロジェクトに先立つ研究において、データ科学分野の次元圧縮技術を利用することで、グリーン関数のデータを劇的に圧縮できることが分かった [1]。この技術は、感受率の計算に必要なメモリと計算量を近似無しに大幅に削減し、これまでの困難を打破する可能性を持っている。このような分野横断的な計算技術を用いた独自のアプローチによって、強相関多軌道系における相転移と動的感受率の第一原理計算を実現することを目指す。

## 4. 研究成果

(1) DMFT 法において波数依存した動的・静的感受率を計算するには、二粒子グリーン関数の満たすバーテ・サルピータ (BS) 方程式を解く必要がある。しかし、この方程式を解くのに要する計算時間は軌道数に対して急激に増大し、現実的モデルに適用することが困難となる。

本研究では、感受率の計算において主要な役割を果たすバーテックス部分を詳細に調べ、強相関領域で漸近的に厳密となる近似を導入することで、極めて簡単に静的感受率を得る公式 (SCL 公式) を導出した [2]。この近似は、相転移近傍において単一の揺らぎモードが発達するという「物理的洞察」と、その揺らぎモードを抽出できる「データ科学」(主成分分析) が融合した結果導き出された独自公式である。この新しい公式は、十分な精度を保ちつつ計算量を劇的に削減しており、現実的な d 軌道や f 軌道の詳細を考慮することが可能である。これにより、DFT+DMFT 法を用いて現実の強相関化合物の磁性や軌道秩序を計算することが可能となった。

さらに、SCL 公式を実際の強相関化合物に応用し、その精度を検証した。具体的には、強磁性を示す単体遷移金属 Fe に注目し、強磁性転移温度と強磁性モーメントを DFT+DMFT 法により計算した。その結果、これまでの計算で得られていた転移温度と同程度の値が得られることを確認した。この結果は、SCL 公式がモデル計算だけでなく、軌道自由度を持つ実際の化合物計算においても有用なことを示している。

(2) 前述の SCL 公式は、静的感受率に特化した近似公式であるため、そのまま動的感受率に適用することはできない。動的感受率の計算を実現するために、一粒子グリーン関数において導入された中間表現基底 (IR 基底) を二粒子グリーン関数へ拡張した [3]。この技術を用いることで、動的感受率の計算で障壁となるデータ量と計算量が劇的に緩和される。これにより、一粒子グリーン関数と二粒子グリーン関数を、IR 基底を用いて統一的にコンパクトな空間で扱うことが可能となった。この成果は、DFT+DMFT 法による動的感受率計算の実現へと繋がる成果である。

(3) IR 基底により一粒子グリーン関数と二粒子グリーン関数をコンパクトに表現できるようになったが、この基底を量子多体計算に応用するためには、コンパクトな表現のまま「演算」を行う必要がある。従来では、IR 基底から一旦、通常の松原振動数基底に変換し、その基底で演算を行った後、再び IR 基底に戻す必要があったため、IR 基底の利点を活かしてきれていなかった。本研究では、IR 基底のコンパクトさを保ちつつ演算を行う「スパースサンプリング」法を提案した[4]。この新しい方法は、一粒子グリーン関数や二粒子グリーン関数を含む方程式におけるデータ量や計算量の問題を一挙に解決する可能性のあるものである。

(4) IR 基底を超伝導計算に応用した。超伝導転移温度を得るには、Migdal-Eliashberg 方程式と呼ばれる方程式を解く必要があるが、この方程式は一粒子グリーン関数の松原振動数に関する和を含むため、現実的な超伝導転移温度である 10K 以下の計算は困難である。本研究では、この方程式の計算に IR 基底を用いることで、松原振動数に関する和を効率的に実行し、低温の計算を実現した[5]。それにより、第一原理計算を出発点として、Nb の超伝導転移 (約 10K) を得ることに成功した。これは、10K 以下の現実的な超伝導転移温度計算に対して、IR 基底を用いることの有用性を示す結果である。

(5) 本研究におけるデータ科学的アプローチの中心である「スパースモデリング」に関する招待総説論文を出版した[6]。スパースモデリングは大規模データから重要なパラメーターを見つけ出す方法論で、利用できるデータ量が増大している近年、その応用が広がっている。

本総説の前半では、スパースモデリングの基本的な概念から方程式の解説、数値解法、物性実験への応用例を幅広く解説している。スパースモデリングに馴染みの浅い物性研究者が応用研究を始める際の導入としての役割を果たす。後半では、本研究の成果である、スパースモデリングの量子多体論への応用を解説している。具体的には、①量子モンテカルロ法などでスペクトルを得る際に必要となる解析接続への応用、②グリーン関数を極めてコンパクトに表現する IR 基底の導入と応用、について解説している。この成果は、量子多体論への新しいアプローチを提案しているだけでなく、スパースモデリングとは一見関連のない物性理論の研究にもその方法が有効であることを示したという意義もある。本研究プロジェクトの集大成となる成果である。

(6) 本研究の遂行の過程で開発した以下の 4 つのプログラムを、オープンソースソフトウェアとして公開した。

- ① DFT+DMFT 法による強相関化合物の電子状態計算プログラム DCore [7]
- ② スパースモデリング解析接続法 SpM [8]
- ③ IR 基底を手軽に利用できるライブラリ irbasis [9]
- ④ 連続時間量子モンテカルロ法による量子格子模型ソルバーALPS/CT-INT [10]

(7) 動的平均場法にかかわる研究者間の交流および情報共有のために、以下の研究会を主催した。

- ① 「第 2 回動的平均場近似計算に関する情報交流会(ワークショップ)」、2018 年 6 月 18 日～19 日、埼玉大学
- ② 「第 3 回動的平均場近似計算に関する情報交流会(ワークショップ)」、2019 年 12 月 2 日～3 日、静岡

#### <引用文献>

- [1] H. Shinaoka, J. Otsuki, M. Ohzeki, K. Yoshimi, "Compressing Green's function using intermediate representation between imaginary-time and real-frequency domains", *Phys. Rev. B* 96, 035147(1-8) (2017)
- [2] J. Otsuki, K. Yoshimi, H. Shinaoka, Y. Nomura, "Strong-coupling formula for momentum-dependent susceptibilities in dynamical mean-field theory", *Phys. Rev. B* 99, 165134 (2019)
- [3] H. Shinaoka, J. Otsuki, K. Haule, M. Wallerberger, E. Gull, K. Yoshimi, M. Ohzeki, "Overcomplete compact representation of two-particle Green's functions", *Phys. Rev. B* 97, 205111 (2018)
- [4] H. Shinaoka, D. Geffroy, M. Wallerberger, J. Otsuki, K. Yoshimi, E. Gull, J. Kuneš, "Sparse sampling and tensor network representation of two-particle Green's functions", *SciPost Phys.* 8, 012 (2020)
- [5] T. Wang, T. Nomoto, Y. Nomura, H. Shinaoka, J. Otsuki, T. Koretsune, R. Arita, "Efficient ab initio Migdal-Eliashberg calculation considering the retardation effect in phonon-mediated superconductors", *Phys. Rev. B* 102, 134503 (2020)
- [6] J. Otsuki, M. Ohzeki, H. Shinaoka, K. Yoshimi, "Sparse Modeling in Quantum Many-Body Problems", *J. Phys. Soc. Jpn.* 89, 012001 (2020)
- [7] H. Shinaoka, J. Otsuki, M. Kawamura, N. Takemori, K. Yoshimi, "DCore: Integrated DMFT software for correlated electrons", *SciPost Phys.* 10, 117 (2021)

- [8] K. Yoshimi, J. Otsuki, Y. Motoyama, M. Ohzeki, H. Shinaoka, "SpM: Sparse modeling tool for analytic continuation of imaginary-time Green's function", *Computer Phys. Commun.* 244, 319-323 (2019)
- [9] N. Chikano, K. Yoshimi, J. Otsuki, H. Shinaoka, "irbasis: Open-source database and software for intermediate-representation basis functions of imaginary-time Green's function", *Computer Phys. Commun.* 240, 181-188 (2019)
- [10] H. Shinaoka, Y. Nomura, E. Gull, "Efficient implementation of the continuous-time interaction-expansion quantum Monte Carlo method", *Computer Phys. Commun.* 252, 106826 (2020)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 27件/うち国際共著 10件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Wang Tianchun, Nomoto Takuya, Nomura Yusuke, Shinaoka Hiroshi, Otsuki Junya, Koretsune Takashi, Arita Ryotaro	4. 巻 102
2. 論文標題 Efficient ab initio Migdal-Eliashberg calculation considering the retardation effect in phonon-mediated superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134503-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.134503	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 Weh A., Otsuki J., Schnait H., Evertz H. G., Eckern U., Lichtenstein A. I., Chioncel L.	4. 巻 2
2. 論文標題 Spectral properties of heterostructures containing half-metallic ferromagnets in the presence of local many-body correlations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43263-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043263	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 該当する
1. 著者名 Shinaoka Hiroshi, Nagai Yuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Sparse modeling of large-scale quantum impurity models with low symmetries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.045120	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 Nomura Yusuke	4. 巻 89
2. 論文標題 Machine Learning Quantum States -- Extensions to Fermion-Boson Coupled Systems and Excited-State Calculations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054706 ~ 054706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.054706	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 Tsuji Naoto, Nomura Yusuke	4. 巻 2
2. 論文標題 Higgs-mode resonance in third harmonic generation in NbN superconductors: Multiband electron-phonon coupling, impurity scattering, and polarization-angle dependence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043029-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043029	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 Nomura Yusuke, Nomoto Takuya, Hirayama Motoaki, Arita Ryotaro	4. 巻 2
2. 論文標題 Magnetic exchange coupling in cuprate-analog d9 nickelates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043144-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043144	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 Hirschberger Max, Nomura Yusuke, Mitamura Hiroyuki, Miyake Atsushi, Koretsune Takashi, Kaneko Yoshio, Spitz Leonie, Taguchi Yasujiro, Matsuo Akira, Kindo Koichi, Arita Ryotaro, Tokunaga Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 103
2. 論文標題 Geometrical Hall effect and momentum-space Berry curvature from spin-reversed band pairs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L041111-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L041111	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 野村悠祐、平山元昭、北谷基治、只野央将、有田亮太郎	4. 巻 55
2. 論文標題 ニッケル酸化物新超伝導体の発見：現状と展望	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 491-503
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 野村悠祐	4. 巻 56
2. 論文標題 機械学習手法を用いて量子多体系に挑む 手法拡張を含む最近の進展	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 117~130
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 Otsuki Junya, Yoshimi Kazuyoshi, Shinaoka Hiroshi, Nomura Yusuke	4. 巻 99
2. 論文標題 Strong-coupling formula for momentum-dependent susceptibilities in dynamical mean-field theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165134-1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.165134	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 Chikano Naoya, Yoshimi Kazuyoshi, Otsuki Junya, Shinaoka Hiroshi	4. 巻 240
2. 論文標題 irbasis: Open-source database and software for intermediate-representation basis functions of imaginary-time Green's function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 181 ~ 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2019.02.006	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 Yoshimi Kazuyoshi, Otsuki Junya, Motoyama Yuichi, Ohzeki Masayuki, Shinaoka Hiroshi	4. 巻 244
2. 論文標題 SpM: Sparse modeling tool for analytic continuation of imaginary-time Green's function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 319 ~ 323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2019.07.001	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 Otsuki Junya, Ohzeki Masayuki, Shinaoka Hiroshi, Yoshimi Kazuyoshi	4. 巻 89
2. 論文標題 Sparse Modeling in Quantum Many-Body Problems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 012001 ~ 012001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.012001	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 Shinaoka Hiroshi, Geffroy Dominique, Wallerberger Markus, Otsuki Junya, Yoshimi Kazuyoshi, Gull Emanuel, Kunes Jan	4. 巻 8
2. 論文標題 Sparse sampling and tensor network representation of two-particle Green's functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SciPost Physics	6. 最初と最後の頁 012-1 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhys.8.1.012	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 該当する

1. 著者名 Li Hengyue, Otsuki Junya, Naka Makoto, Ishihara Sumio	4. 巻 101
2. 論文標題 Optical response in the excitonic insulating state: Variational cluster approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125117-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.125117	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 Li Jia, Wallerberger Markus, Chikano Naoya, Yeh Chia-Nan, Gull Emanuel, Shinaoka Hiroshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Sparse sampling approach to efficient ab initio calculations at finite temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035144-1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.035144	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 該当する



1. 著者名 Tadano Terumasa, Nomura Yusuke, Imada Masatoshi	4. 巻 99
2. 論文標題 Ab initio derivation of an effective Hamiltonian for the La <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub> /La <sub>1.55</sub> Sr <sub>0.45</sub> CuO <sub>4</sub> heterostructure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155148-1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.155148	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 Shinaoka Hiroshi, Nomura Yusuke, Gull Emanuel	4. 巻 252
2. 論文標題 Efficient implementation of the continuous-time interaction-expansion quantum Monte Carlo method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 106826 ~ 106826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2019.06.016	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 該当する

1. 著者名 Nomura Yusuke, Hirayama Motoaki, Tadano Terumasa, Yoshimoto Yoshihide, Nakamura Kazuma, Arita Ryotaro	4. 巻 100
2. 論文標題 Formation of a two-dimensional single-component correlated electron system and band engineering in the nickelate superconductor NdNiO <sub>2</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205138-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.205138	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 Pizzi Giovanni, Yusuke Nomura (19番目)、他29名	4. 巻 32
2. 論文標題 Wannier90 as a community code: new features and applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 165902 ~ 165902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab51ff	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 該当する

1. 著者名 Hirayama Motoaki, Tadano Terumasa, Nomura Yusuke, Arita Ryotaro	4. 巻 101
2. 論文標題 Materials design of dynamically stable d9 layered nickelates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075107-1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.075107	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 Shinaoka Hiroshi, Otsuki Junya, Haule Kristjan, Wallerberger Markus, Gull Emanuel, Yoshimi Kazuyoshi, Ohzeki Masayuki	4. 巻 97
2. 論文標題 Overcomplete compact representation of two-particle Green's functions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205111-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.205111	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 該当する

1. 著者名 Chikano Naoya, Otsuki Junya, Shinaoka Hiroshi	4. 巻 98
2. 論文標題 Performance analysis of a physically constructed orthogonal representation of imaginary-time Green's function	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035104-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.035104	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 Yue Changming, Wang Yilin, Otsuki Junya, Dai Xi	4. 巻 236
2. 論文標題 CT-X: An efficient continuous-time quantum Monte Carlo impurity solver in the Kondo regime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 135 ~ 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2018.10.025	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 該当する

1. 著者名 Chikano Naoya, Yoshimi Kazuyoshi, Otsuki Junya, Shinaoka Hiroshi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 irbasis: Open-source database and software for intermediate-representation basis functions of imaginary-time Green's function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2019.02.006	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 Darmawan Andrew S., Nomura Yusuke, Yamaji Youhei, Imada Masatoshi	4. 巻 98
2. 論文標題 Stripe and superconducting order competing in the Hubbard model on a square lattice studied by a combined variational Monte Carlo and tensor network method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205132-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.205132	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 該当する

1. 著者名 Carleo Giuseppe, Nomura Yusuke, Imada Masatoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Constructing exact representations of quantum many-body systems with deep neural networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5322-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-07520-3	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 該当する

1. 著者名 Honerkamp Carsten, Shinaoka Hiroshi, Assaad Fakher F., Werner Philipp	4. 巻 98
2. 論文標題 Limitations of constrained random phase approximation downfolding	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235151-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.235151	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 該当する

〔学会発表〕 計100件（うち招待講演 30件 / うち国際学会 47件）

1. 発表者名 大槻純也
2. 発表標題 動的平均場理論による非局所相関の計算とGPU化
3. 学会等名 物性研究所スパコン共同利用・CCMS合同研究会「計算物質科学の新展開2020」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tianchun Wang, Takuya Nomoto, Yusuke Nomura, Hiroshi Shinaoka, Junya Otsuki, Takashi Koretsune, Ryotaro Arita
2. 発表標題 Efficient ab initio Migdal-Eliashberg calculation considering the retardation effect in phonon-mediated superconductors
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Shinaoka
2. 発表標題 Dimensionality reduction of Green's function theories
3. 学会等名 International Workshop on High-Performance Computing and Programming on Quantum Chemistry and Physics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Application of machine learning beyond benchmarks reveals Dirac-type nodal spin liquid in the J1-J2 Heisenberg model
3. 学会等名 Machine Learning for Quantum Simulation（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 ボルツマンマシンを用いた量子多体波動関数表現：深層ボルツマンマシンによる厳密な表現と制限ボルツマンマシンによる数値的近似表現
3. 学会等名 Deep learning and Physics 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 機械学習手法を用いた量子多体系の研究 -手法拡張を含む最近の進展
3. 学会等名 CMTセミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 ニッケル酸化物超伝導体NdNiO <sub>2</sub> における強相関電子系形成と新物質デザイン
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Machine learning quantum states    Extension of methods and application to frustrated spin systems
3. 学会等名 International Conference on Fugaku project Emergence and Functionality of Quantum Matter 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 ニッケル酸化物新超伝導体における強相関電子系形成と物質デザイン
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所 研究会 「高温超伝導・非従来型超伝導研究の最前線：多様性と普遍性」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 機械学習を用いた2次元J1-J2ハイゼンベルグ模型の研究
3. 学会等名 物性研究所スパコン共同利用・CCMS合同研究会「計算物質科学の新展開2020」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 機械学習を用いた量子多体波動関数表現：物理の難問であるフラストレーションのある量子スピン系への適用
3. 学会等名 第11回材料系ワークショップ ～マテリアルDXを加速する「富岳」を活用した成果の創出に向けて～
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Magnetic exchange coupling in theoretically-designed cuprate-analog d9 nickelates
3. 学会等名 APS March meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum annealing and machine learning - learning and Black-box optimization
3. 学会等名 Ellis QPhML 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum annealing, its theory and several applications in industry
3. 学会等名 School on Modern Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum Annealing and Its Application to Real World
3. 学会等名 ISMVL 2020(IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum Annealing and its Application to Real Industry
3. 学会等名 RIEC International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉見一慶
2. 発表標題 スパースモデリングを用いた解析接続と圧縮基底の応用
3. 学会等名 東京大学物性研究所 機械学習セミナー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉見一慶
2. 発表標題 物性研究分野でのオープンソースソフトウェア開発・高度化プロジェクトの紹介
3. 学会等名 第13回K-CONNEX研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉見一慶, 三澤貴宏, 圓谷貴夫
2. 発表標題 Pd(dmit) <sub>2</sub> 塩の第一原理ハミルトニアンの有温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Otsuki, K. Yoshimi, H. Shinaoka, Y. Nomura
2. 発表標題 Strong-coupling formula of momentum-dependent susceptibilities in dynamical mean-field theory
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (FCES19) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 大槻純也
2. 発表標題 多極子秩序の第一原理計算の現状報告
3. 学会等名 J-Physics 地域研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Otsuki, K. Yoshimi, H. Shinaoka, Y. Nomura
2. 発表標題 Strong-coupling formula for momentum-dependent susceptibilities in the dynamical mean-field theory
3. 学会等名 J-Physics 2019 International Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Otsuki
2. 発表標題 Spatial Correlations and Superconductivity in Dynamical Mean-Field Theory
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大槻純也
2. 発表標題 動的平均場理論による非局所相互作用の見積もりについて
3. 学会等名 第3回 動的平均場近似計算に関する情報交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大槻純也
2. 発表標題 動的平均場法に基づく非局所相互作用の新しい公式とその応用
3. 学会等名 J-Physics領域全体会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本山裕一, 吉見一慶, 大槻純也, 品岡寛
2. 発表標題 スパースモデリング解析接続への虚時間相関情報の導入
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 品岡寛, 大槻純也, 竹森那由多, 河村光晶, 吉見一慶
2. 発表標題 統合型動的平均場オープンソースソフトウェアDCore ver. 2の紹介
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本山裕一, 吉見一慶, 大槻純也, 品岡寛
2. 発表標題 スパースモデリング解析接続への虚時間相関情報の導入 II
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Andreas Weh, Liviu Chioncel, Junya Otsuki, Ulrich Eckern
2. 発表標題 Charge Reconstruction in Magnetic Heterostructures
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Shinaoka
2. 発表標題 Sparse sampling approach to susceptibility calculations in dynamical mean-field theory
3. 学会等名 International Focus Workshop Computational Approaches to Magnetic Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Shinaoka
2. 発表標題 Tensor learning approach to sparse QMC sampling of two-particle Green's function in DMFT
3. 学会等名 Computational Approaches to Quantum Many-body Problems_ (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Shinaoka
2. 発表標題 Sparse QMC sampling of two-particle Green's function and tensor learning: Application to DMFT
3. 学会等名 The 5th Conference on Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Shinaoka, Junya Otsuki, Nayuta Takemori, Kazuyoshi Yoshimi, Mitsuaki Kawamura
2. 発表標題 DMFT software for Correlated Electrons
3. 学会等名 TRIQS meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 品岡 寛
2. 発表標題 統合型動的平均場計算ソフトウェアDCoreの現状と今後の展望
3. 学会等名 第3回 動的平均場近似計算に関する情報交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Machine learning for solving quantum many-body Hamiltonians
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (FCES19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 物性物理における機械学習
3. 学会等名 パリ異分野融合科学者の会 第1回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Machine learning for studying strongly correlated systems
3. 学会等名 The 5th Conference on Condensed Matter Physics (CCMP) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Machine learning solvers for strongly-correlated systems
3. 学会等名 Computational Approaches to Quantum Many-body Problems (CAQMP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Machine learning for solving strongly-correlated systems
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 ニッケル酸化物超伝導体NdNiO <sub>2</sub> における強相関電子系形成とそのバンドエンジニアリング
3. 学会等名 基研研究会 「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Machine learning for analyzing strongly-correlated systems
3. 学会等名 International Workshop on High-Performance Computing and Programming on Quantum Chemistry and Physics 2020 (HPCQCP2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Nickelate superconductivity –Formation of self-doped 2D single-orbital correlated electron systems in NdNiO <sub>2</sub>
3. 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Symmetry-adapted Wannier functions
3. 学会等名 School on Wannier90 v3.0: new features and applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉見一慶, 河村光晶, 品岡寛, 大槻純也, 本山裕一, 加藤岳生
2. 発表標題 動的平均場理論による多体量子計算を行うためのツールDCoreの利用方法・シミュレーション事例について
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大槻純也, 吉見一慶, 品岡寛
2. 発表標題 強相関領域における動的平均場理論ペーテ・サルピータ方程式の近似解
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 品岡寛, 近野直也, 吉見一慶, 大槻純也, 大関真之
2. 発表標題 温度グリーン関数の圧縮基底: 数値計算ライブラリと応用例の紹介
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本山裕一, 吉見一慶, 大槻純也, 品岡寛
2. 発表標題 スパースモデリングとパデ近似を組み合わせた解析接続法
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近野直也, 野村悠祐, 吉見一慶, 大槻純也, 品岡寛
2. 発表標題 Cd2Re207の第一原理有効モデルの構築と解析
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 品岡寛, Dominique Geffroy, B, Markus Wallerberger, Jan Kunes, Emanuel Gull, 吉見一慶, 大槻純也
2. 発表標題 量子モンテカルロ法における二粒子グリーン関数の圧縮計測
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 比屋根和樹, 近野直也, 大槻純也, 吉見一慶, 大関真之, 品岡寛
2. 発表標題 スパースモデリングとIR基底を用いた温度グリーン関数のノイズ軽減
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉見一慶, 加藤岳生, 木山治樹, 大岩顕
2. 発表標題 量子格子模型ソルバーH を用いた量子ドット系のスピン緩和率解析ツールの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本山裕一, 吉見一慶, 正木晶子, 川島直輝, 加藤岳生
2. 発表標題 量子格子模型の経路積分モンテカルロ法ソルバー DSQSS
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 電子格子相互作用のある系に対する機械学習ソルバーの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junya Otsuki
2. 発表標題 Strong-coupling solution of the Bethe-Salpeter equation in DMFT
3. 学会等名 第2回 動的平均場近似計算に関する情報交流会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junya Otsuki
2. 発表標題 Recent progress on dynamical mean-field calculations of multipole ordering
3. 学会等名 International Workshop on j-fermion Physics and Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junya Otsuki
2. 発表標題 Recent progress on dynamical mean-field calculations of spin, orbital and multipolar ordering
3. 学会等名 Emergent Condensed-Matter Physics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大槻純也
2. 発表標題 動的平均場法を用いた理論計算の現状とコバルト化合物への応用可能性
3. 学会等名 第2回コバルト研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 機械学習を用いた量子多体系の基底状態計算
3. 学会等名 物性研究所スパコン共同利用・CCMS合同研究会「計算物質科学の今と未来」（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Machine learning using Boltzmann machines for solving strongly correlated systems
3. 学会等名 Computational Approaches to Magnetic Systems (CAMS 2018)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Machine-learning solvers for quantum many-body systems
3. 学会等名 日本物理学会 2018度秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Recent progress in machine-learning solvers: calculations of excited states and extensions to electron-phonon coupled systems
3. 学会等名 Mini-workshop on "Machine Learning in Physics" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Nomura
2. 発表標題 Solving quantum many-body Hamiltonians with artificial neural networks
3. 学会等名 Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2018-2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 制限付きボルツマンマシンを用いた量子多体系の機械学習ソルバーの開発
3. 学会等名 第八回「強相関電子系理論の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村悠祐
2. 発表標題 Development of machine-learning solvers for analyzing strongly-correlated electron systems
3. 学会等名 H30年度 ポスト「京」重点課題(7) 第3回CDMS1研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 品岡寛、河村光晶、吉見一慶、加藤岳生、大槻純也
2. 発表標題 量子格子模型プログラムパッケージDCore (integrated DMFT software for CORrelated Electrons)の開発
3. 学会等名 物性研スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の今と未来」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近野直也、吉見一慶、大槻純也、品岡寛
2. 発表標題 温度グリーン関数の圧縮基底: 基本的性質の解析と数値 計算ライブラリの開発
3. 学会等名 第12回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Dominique Geffroy, Hiroshi Shinaoka, Jan Kunes, Junya Otsuki, Markus Wallerberger, Emanuel Gull, Kazuyoshi Yoshimi
2. 発表標題 Dynamical susceptibility in DMFT: a sparse QMC sampling approach
3. 学会等名 ドイツ物理学会 March meeting 2019 (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 T-QARD: activity on quantum computing for evacuation from Tsunami
3. 学会等名 Qubits Europe 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum annealing and its application by an initiative from Tohoku University (Video Presentation)
3. 学会等名 INS (International Conference on Nanoelectronics Strategy) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Adversarial generative network - new generation of image generation
3. 学会等名 ISMRM Annal Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki, Shuntaro Okada, Masayoshi Terabe, Shinichiro Taguchi
2. 発表標題 Quantum Clustering by D-Wave machine - Assessment, Application, Implementation
3. 学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference2018 (AQC18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Tohoku university Quantum Annealing Research and Development for creating new era 新時代を拓く東北大学の量子アニーリング研究 開発
3. 学会等名 Canada-Japan Quantum computing conference 日加量子計算機&暗号シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 T-QARD and DENSO: a great collaboration for optimization in factory
3. 学会等名 Qubits North America 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Optimization of Industrial Problems
3. 学会等名 SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 New method for solving constraints
3. 学会等名 Qubits Europe 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計6件

1. 著者名 Maria Schuld、Francesco Petruccione、大関 真之、荒井 俊太、篠島 匠人、高橋 茶子、御手洗 光祐、山城 悠	4. 発行年 2020年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 368
3. 書名 量子コンピュータによる機械学習	

1. 著者名 大関真之	4. 発行年 2019年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 256
3. 書名 Pythonで機械学習入門	

1. 著者名 橋本 幸士、大槻 東巳、真野 智裕、斎藤 弘樹、藤田 浩之、安藤 康伸、永井 佑紀、青木 健一、藤田 達大、小林 玉青、大関 真之、久良 尚任、福嶋 健二、村瀬 功一、船井 正太郎、柏 浩司、富谷 昭夫	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 212
3. 書名 物理学者，機械学習を使う	

1. 著者名 Irina Rish、Genady Ya. Grabarnik、竹澤邦夫、大関真之、高橋茶子、竹田晃人、徳田悟、藤本晃司、安田宗樹	4. 発行年 2019年
2. 出版社 ジャムハウス	5. 総ページ数 248
3. 書名 スパースモデリング 理論、アルゴリズム、応用	

1. 著者名 西森 秀稔、大関 真之、須藤 彰三、岡 真	4. 発行年 2018年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 160
3. 書名 量子アニーリングの基礎	

1. 著者名 片岡 駿、大関 真之、安田 宗樹、田中 和之、照井 伸彦、小谷 元子、赤間 陽二、花輪 公雄	4. 発行年 2018年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 264
3. 書名 画像処理の統計モデリング	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	吉見 一慶  (Yoshimi Kazuyoshi)  (10586910)	東京大学・物性研究所・特任研究員    (12601)	
研究分担者	野村 悠祐  (Nomura Yusuke)  (20793756)	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員    (82401)	
研究分担者	品岡 寛  (Shinaoka Hiroshi)  (40773023)	埼玉大学・理工学研究科・助教    (12401)	
研究分担者	大関 真之  (Ohzeki Masayuki)  (80447549)	東北大学・情報科学研究科・教授    (11301)	

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
---------	---------



ドイツ	アウグスブルク大学	アーヘン工科大学		
オーストリア	ウィーン工科大学			
米国	ミシガン大学			