

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月23日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540395

 研究課題名（和文） 非対角有効場を用いた第一原理非局所電子相関理論の構築と
準二次元鉄系化合物への応用

 研究課題名（英文） Construction of the First-Principles Non-Local Theory of
Electron Correlations and Its Application to the Quasi-Two
Dimensional Iron Compounds

研究代表者

梯 祥郎（KAKEHASHI YOSHIRO）

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：10191975

研究成果の概要（和文）：

電子相関の強い物質を定量的に記述するために我々が発展させてきた理論に現実的なハミルトニアンと非局所効果を取り入れる理論的改良を行った。T=0では、これまでの非対角有効場を用いた非局所自己無撞着射影演算子理論（SCPA）を拡張して、TB-LMTO-LDA+Uハミルトニアンから出発する第1原理SCPM理論の定式化を行った。さらに、具体的な問題で必要となってくる局所相関関数の計算を可能にする運動量依存局所変分理論を発展させた。有限温度では、動的CPA理論に長距離非局所効果を取り入れる非局所動的CPA理論の定式化を行った。さらに、高温近似で非局所効果を完全に取り入れる第1原理分子動力学理論を発展させた。動的効果を取り入れた第1原理非局所動的CPA理論(T>0)の構築は今後の課題である。

研究成果の概要（英文）：

In order to describe the properties of correlated electron systems quantitatively, we have extended our theories of electron correlations towards the first-principles and nonlocal theory. At T=0, we formulated the first-principles nonlocal theory on the basis of the self-consistent projection operator method (SCPM) and the LDA+U Hamiltonian. In addition, we developed the momentum-dependent local-ansatz variational theory to calculate the static correlation functions which appear in the 1st-principles SCPM. At finite temperatures, we formulated the nonlocal dynamical CPA which takes into account the long-range inter-site correlations on the basis of the off-diagonal effective medium and the incremental cluster expansion. Furthermore we developed the first-principles molecular dynamics method which describes the nonlocal inter-site correlations within the high-temperature approximation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学 数理物理・物性基礎

キーワード： 電子相関，非対角有効場，非局所電子相関，第一原理計算，鉄系化合物

1. 研究開始当初の背景

金属・絶縁体転移，磁性，超伝導など物質の多くの性質はそれらの電子状態と電子間相互作用によって説明できると考えられており，固体内電子の電子間相互作用を取扱う理論の構築と開発がこれまで多くの研究者によって行われてきた．とりわけ，銅酸化物超伝導体の発見以来，強い電子間相互作用を取り扱う理論が急速に発展させられ，モンテカルロ法，数値繰込み群，動的平均場理論などの新しい方法が次々と提案されて今日に至っている．このような物性基礎理論の進歩の中で，我々も，10年ほど前から電子間相互作用を取り入れて電子状態と磁性を定量的に取り扱う本格的な理論研究を3つの方向から進めてきた（図1参照）．

第1の方向は，従来の金属磁性体のシングルサイトスピン揺らぎの有効場理論を動的な場合に拡張した動的CPA（コヒーレントポテンシャル近似）理論とその改良である（PRB **45**, 7196(1992); PRB **65**, 184428(2002))．第2の方向は従来の射影演算子グリーン関数法に有効場を導入して自己無撞着に1粒子励起スペクトルを求める射影演算子CPA理論の提案とその拡張（PRB **69**, 045101 (2004); PRB **70**, 195102(2004))，第3の方向は局所電子相関を記述するGutzwiller型変分波動関数に運動量依存変分パラメータを導入した新しい局所変分理論とその改良である（JPSJ **77**, 114702(2008))．

平成19・20年度においては，科学研究費補助金(基盤研究(C))を受けて，射影演算子CPA理論を拡張して長距離非局所電子相関を取り入れる自己無撞着射影演算子理論(SCPM)を構築した（JPSJ **76**, 074702(2007); JPSJ **78**, 124710(2009))．そして，銅酸化物にみられるマージナルフェルミ液体状態をミクロな立場から初めて導出した．平成21年度には，第1の方法，即ち，動的CPA理論とバンド理論における強束縛・線形マフィンティン軌道法(TB-LMTO)を結合させて現実の物質の電子状態と磁性を第1原理的に計算する第1原理動的CPA理論を提出し，

Fe,Co,Niの磁化-温度曲線，帯磁率，電子状態などの定量的側面を明らかにした（JPSJ **77**, 094706(2008); JPSJ **78**, 093705 (2009))．

これまでの第1原理動的CPA計算によって3d遷移金属系の有効ボーア磁子数や高温側の1粒子状態密度を定量的に記述できることを示したが，一方で，FeおよびCoのキュリー温度は第1原理計算においても実験値の1.8倍もの大きな値となることを見出し，定量的な一致を得るためには，今後，非局所電子相関を取り入れることが不可欠であることが明らかとなってきた．

他方，近年，LaFeAsOやSrFe₂As₂などを親物質とするFe系超伝導物質が次々と発見されて，Fe系化合物の電子状態と磁性の解明が高温超伝導機構を解明する上で重要になってきている．銅酸化物では，低エネルギー領域の電子状態は単一軌道ハバードモデルで表されるが，Fe系高温超伝導体では，光電子分光実験においてもバンド計算においても全てのdバンドがフェルミ面を切っていること，Asのp軌道とFeのd軌道の混成が重要であることが見出されており，第1原理的アプローチが必要であることが明らかになってきた．しかも，これらの物質は2次元性の強い構造を持っているために，シングルサイト近似を超えた非局所電子相関が特に重要になってくる．事実，純Fe(Schafer et al., PRL **92**, 097205 (2004))やFeAs(122)系化合物(Richard et al., PRL **102**, 047003 (2009))では，銅酸化物と同様，多重の準粒子バンドにキック構造が現れることが角度分解光電子分光実験で見出されており，磁気的な非局所電子相関によって引き起こされたものと解釈されている．また，これら準二次元物質のネール温度も非局所電子相関を無視して議論できないことは明らかである．

以上のように，最近の我々の第1原理動的CPAの研究成果とFe系化合物の急速な進展によって，現実的なハミルトニアンから出発する非局所電子相関理論の構築が今後の物性理論の最重要課題の1つであることが明らかになってきた．



図1：著者が開発・発展させてきた相関の強い電子系に対する3つのアプローチ。

2. 研究の目的

本研究では、(1) $T=0$ で我々が発展させた非局所自己無撞着射影演算子理論と第1原理 TB-LMTO バンド理論を結合させる第1原理非局所自己無撞着射影演算子理論(第1原理非局所 SCPM)の構築へ向けた理論の改良を行い、(2) $T>0$ で我々がこれまで建設してきた第1原理動的 CPA 理論に非局所電子相関を取り入れた第1原理非局所動的有効場理論(第1原理非局所 DCPA)を構築することを目的とする。そして、これらの理論を Fe および Fe 系高温超伝導化合物に応用して、それらの電子状態と磁性を定量的に明らかにすることを最終的な目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、理論の構築と応用について次の(1)～(5)の項目に分けて研究を行う。

(1) ハミルトニアンの設定・第1原理動的 CPA の定量性

強束縛線形バンド計算法(TB-LMTO)に基づく LDA+U ハミルトニアンの定量性と最密充填構造から外れた鉄系化合物へのその適用可能性について最初に検討しておく。具体的には、クーロン・交換相互作用定数の値の違いが物理量に与える影響を第1原理動的 CPA によって調べる。さらに、最も簡単な Fe 系化合物 FeSe について LMTO バンド計算を行い、最密充填構造から外れた準2次元系バンド構造の定量性を確認する。また、第1原理動的 CPA の定量性を確かめるために、励起スペクトル状態密度の系統的な計算を行い、XPS-BIS などの実験データと比較して検討する。

(2) 第1原理非局所 SCPM の定式化

$T=0$ の非局所自己無撞着射影演算子理論(SCPM)を第1原理 TB-LMTO-LDA+U ハミルトニアンの場合へ拡張して、第1原理非局所 SCPM を定式化する。この場合、多軌道間クーロン・交換相互作用を取扱う必要がある。自己エネルギーを求めるために繰込まれた摂動展開法(RPT)を用いるが、この部分の計算が行列形式となるので複雑になってくる。具体的な計算において、場合によっては、第1原理局所変分理論などによる静的相関関数の計算が必要になることも考えられる。その場合は、改めて方法を検討する。

数値計算では、クラスター増加展開の最低次(2サイトクラスター増加項)までを取り入れる。Coulomb エネルギーパラメーター U, J は LDA+DMFT の先行計算の値を用いて、問題があれば後で再考する。計算を実行し、得られた1粒子励起スペクトルから、 $T=0$ における磁化、交換分裂を計算して光電子分光実験の結果と比較検討する。妥当な値が得られない場合は Coulomb 相互作用 U, J を多少修正して定量性を検討する。定量性が確認できれば、主要な k 点に沿って励起スペクトルを求め、長距離強磁性相関による準粒子励起スペクトルの変化、特に、実験的に見出されたキック構造が出現するかどうかを調べる。

(3) 有限温度非局所動的 CPA の定式化

最初に、最も簡単なハバードモデルに基づいて有限温度動的 CPA 理論(DCPA)を非局所 DCPA に拡張する理論の定式化を行う。この場合、汎関数積分法を適用して、自由エネルギーを静的補助場 ξ_i の有効ポテンシャル $E(\{\xi_i\})$ で表しておく。ここで、非対角有効媒質 $\Sigma_{ij\sigma}(i\omega_n)$ を導入して、有効媒質からのクラスター展開を行い、長距離非局所効果を取り入れる。非局所 DCPA では、磁気モーメントやエネルギーなどの物理量は $E(\{\xi_i\})$ を重みとする $3N$ 重積分で表される(N は原子数)ので簡単には求められない。これらの半古典平均を評価するために、エルゴート性を仮定した補助場等温分子動力学法(MD) (PRB **57**, 8354(1998); PRB **59**, 8664(1999))を適用する。磁気力を解析的に計算し、数値計算可能な形に整理する。MD 法はモンテカルロ法に比べてシステムサイズを大きく取ることができるので、長距離相関を取り扱うのに適している。うまく定式化できれば、非局所 DCPA 理論を最も簡単な単純立方格子ハバードモデルへ適用する。

(4) 有限温度第1原理非局所 DCPA の定式化と Fe に対する試行計算

有限温度非局所 DCPA を TB-LMTO-LDA+U ハミルトニアンから出発する第1原理非局所 DCPA へ拡張する。モデルハミルトニアンの場合

合と同様、有効ポテンシャルに非局所相互作用が入ってくるので、静的補助場で表された物理量の平均値を直接求めることが困難となる。これを数値的に実行するために、我々が開発した補助場分子動力学法(MD)を用いて非局所系の物理量を計算する。MD法を応用して、純Feの1粒子励起スペクトルと磁性、特にキュリー温度を数値的に調べて、第1原理非局所DCPAの定量性を明らかにする。

(5) 鉄系化合物への応用

手持ちのLMT0コードを用いて鉄砒素系超伝導体の親物質BaFe₂As₂ならびにSrFe₂As₂系のTB-LMT0+Uハミルトニアンを作成する。得られたハミルトニアンにT=0の第1原理非局所SCPMを適用する。2サイトクラスター増加展開の範囲で、常磁性状態における1粒子励起スペクトルを求めて、これらの物質における非局所電子相関の役割を明らかにする。次に、リジッドバンド近似で電子数を変えて、準粒子バンドの運動量分散曲線の異常、キック構造出現などについて数値的に調べる。

次に、有限温度第1原理非局所DCPAを用いて有限温度におけるBaFe₂As₂、SrFe₂As₂準2次元反強磁性体の電子状態と磁性を明らかにする。1粒子励起スペクトルを光電子分光実験と比較してどこまで理論が実験を説明できるか検討する。また、帯磁率の温度変化とネール温度T_Nを計算してこれらの物質の反強磁性がどこまで定量的に説明できるかを明らかにする。これらがうまくいけば、T_Nのドーピング依存性をリジッドバンド近似の範囲で定量的に計算する。

4. 研究成果

(1) 動的CPA・ハミルトニアンの定量性

第1原理動的CPA理論の定量性を明らかにするために、3つの具体的計算を行った。第1にScからCuまでの励起スペクトルの計算を行ない、XPSおよびBISデータと比較した。その結果、少なくとも高温側では、第1原理動的CPA理論がこれらの励起スペクトルを定量的に説明できる事、また、動的効果が準粒子バンド領域のバンド幅を縮め、高エネルギー側の6eVサテライト構造を作り上げる事を明らかにした。さらに、動的効果によりCuのdバンドのピークも低エネルギー側へ押し下げられることを見出した (PRB **81**, 245133(2010))。

第2に、我々が用いる第一原理LDA+Uハミルトニアンの交換相互作用パラメーターがconstraint LDA法(c-LDA)とconstraint RPA法(c-RPA)の間で30%異なってくるという新しい事実が最近になって報告されたので、非局所理論の構築に取りかかる前にこれらの値の違いがFe, Co, Niの磁性にどのような

影響を及ぼすかについて調べた。第1原理動的CPAを用いてこれらの遷移金属の有限温度磁性を調べた結果、c-RPAの値は低温側の磁化や状態密度を改善するが、高温側の帯磁率やキュリー温度についてはc-LDAの値の方がより妥当な結果を与えることがわかった。特に、Niではc-RPAから得られた交換相互作用パラメーターは磁化とキュリー温度の両方を過小評価する (JPSJ **80**, 034706(2011); PRB **83**, 144409(2011))。

第3に第1原理LDA+Uハミルトニアン構築の出発点となるTB-LMT0-ASA法が鉄ニクタイト系に対しても適用可能であることを明らかにするために、FeSe準二次元化合物のバンド計算を行い、結果を擬ポテンシャル平面波法の結果と比較検討した。その結果、いくつかのエンプティ球が必要となるが、フェルミ面を挟む1Ryのエネルギー範囲で擬ポテンシャル法の結果と定量的に良い一致を示すことがわかった。

(2) 第1原理非局所自己無撞着射影演算子理論(SCPM)の構築

完全に自己無撞着なSCPMの定量性を明らかにするために、理論を銅酸化物高温超伝導体に対応する2次元ハバードモデルに適用し、励起スペクトル状態密度(DOS)、運動量依存励起スペクトル、フェルミ面のドーピング濃度依存性を計算した。その結果、これまでの量子モンテカルロクラスター動的近似理論の結果と定量的一致を示すことを明らかにした。さらに、運動量・エネルギー解像度の優れた我々の理論では、DOSのピークがフェルミレベルにくるドーピング濃度が0.123となることを見出し、これが銅酸化物における1/8不安定性を引き起こしていることを見出した (J. Korean Phys. 掲載決定)。

TB-LMT0-LDA+Uハミルトニアンに基づく第1原理SCPMの定式化を行った。この理論では、射影演算子法によって定式化された運動量表示遅延グリーン関数から出発し、運動量依存自己エネルギーを実空間非対角自己エネルギー $\Lambda_{i\ell\sigma j\ell'\sigma'}(z)$ の逆フーリエ展開で求める。後者を計算するために非対角有効媒質 $\Sigma_{i\ell\sigma j\ell'\sigma'}(z)$ を新しく導入し、有効媒質から出発するクラスター増加展開法によって $\Lambda_{i\ell\sigma j\ell'\sigma'}(z)$ を求める。クラスター展開の各項は非対角有効媒質中の非対角クラスターメモリー関数によって表される。これらのメモリー関数を我々が発展させてきた繰込まれた摂動展開法(RPT)によって求める。このような定式化を行うことによって、無限まで遠くの非対角成分(即ち、長距離非局所効果)を取り入れた、しかも他の方法では得られない高い運動量分解能をもつ励起スペクトルを計算できる。最初に導入した非対角有効媒質はそれからの散乱が消える条件、即ち、拡

張された CPA 方程式 $\Sigma_{i\ell\sigma j\ell'\sigma'}(z) = \Lambda_{i\ell\sigma j\ell'\sigma'}(z)$ を自己無撞着に解くことによって求めることができる。

実空間メモリ関数の具体的な計算では、多軌道のために局所電荷・電荷相関関数、局所電荷・スピン相関関数、局所スピン・スピン相関関数の定量的な計算が必要になり、これらを求めるためには次に述べる第1原理運動量依存局所変分波動関数の理論を構築する必要がある。

(3) 第1原理運動量依存局所変分理論へ向けた改良

局所変分波動関数の理論を改良して弱相関および中間結合領域の電子相関を正しく記述する運動量依存局所変分理論を発展させた (JPSJ **80**, 114708 (2011)). この方法では、まず運動量空間における2粒子励起状態を考え、それらの確率振幅を変分パラメータとして最適化したものを局在軌道へ射影する。それによって、運動量分布関数・有効質量などの低エネルギー物理量や2重占有数などの局所相関量を格段に改善できることを見出した。

更に、出発点となるハートレー・フォック波動関数をハバードの合金類似波動関数へ一般化することによって、弱相関から強相関までの全ての相互作用領域で従来の局所変分理論並びに Gutzwiller 変分理論を超える新しい運動量依存局所変分理論を確立した (JPSJ **82** 013701 (2012); JPSJ 投稿中)。

TB-LMTO LDA+U ハミルトニアンに基づき第1原理運動量依存局所変分理論を定式化した。変分原理から導かれる変分パラメータの自己無撞着方程式は行列形式となり複雑になるので、具体的な計算は次年度以降の研究課題として残されている。

(4) 非局所動的 CPA 理論の開発

高温近似 (静的近似) では有効ポテンシャルが比較的簡単に求められ、且つ実軸上への解析接続ができるので、有効媒質、分子動力学 (MD)、リカーゾン法を用いた第1原理計算が可能である。高温近似の MD 理論を構築し、この理論を Mn_3Pt 系へ適用して理論の定量性を検討した。その結果、この系のノンコリニア磁気構造を説明し、さらに 400K 付近に見られるノンコリニア・反強磁性転移も説明できることが明らかになった (J. Korean Phys. 掲載決定)。

動的非局所効果を取り入れる理論の構築をハバードモデルに基づいて行った。この理論では、2体の相互作用を Hubbard-Stratonovich 変換によって1体の動的ポテンシャルに変換し、自由エネルギーを静的補助場 $\{\xi_i\}$ の有効ポテンシャル $E(\{\xi_i\})$ で表しておく。この有効ポテンシャルに、非対角有

効媒質 $\Sigma_{ij\sigma}(i\omega_n)$ を導入して、それからのクラスター増加展開を行う。その結果、有効ポテンシャルはシングルサイト、2-サイト、3-サイトクラスター項等に展開できる。夫々のクラスター有効ポテンシャルを静的な項と動的な項に分離し、後者を調和近似と RPA' によって解析的に計算する。非対角有効媒質を決めるためには、さらに自己エネルギー $\Lambda_{ij\sigma}(i\omega_n)$ が必要になる。これを求めるために、有効媒質を出発点とする温度グリーン関数の T 行列表現を用いて自己エネルギーのクラスター増加展開を行う。その結果、夫々のクラスター自己エネルギーは結局のところ、自由エネルギーのクラスター有効ポテンシャルの汎関数微分によって導かれることが証明できた。このようにして求めた非対角自己エネルギーが最初に仮定した非対角有効媒質に等しくなる条件から、媒質を自己無撞着に定めることができる (図2参照)。非局所動的 CPA の定式化については、日本物理学会第68回年会 28pXW-1 で発表した。具体的数値計算は次年度研究課題に引き継がれる。

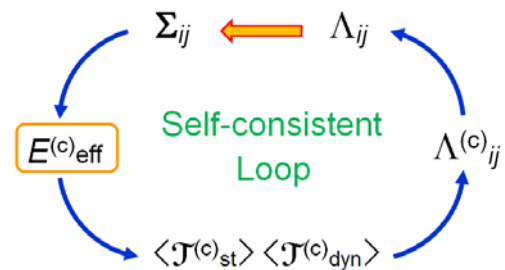


図2: 非局所動的 CPA 理論の自己無撞着ループ。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

- (1) Y. Kakehashi, M. A. R. Patoary, and S. Chandra, Nonlocal Excitations and 1/8 Singularity in Cuprates, to be published in J. Korean Phys. Soc. (2013) 査読有。
- (2) T. Uchida, N. Kimura, and Y. Kakehashi, First-Principles Molecular Dynamics Study on the Magnetic Structure of Mn_3Pt , to be published in J. Korean Phys. Soc. (2013) 査読有。
- (3) M. A. R. Patoary, S. Chandra, and Y. Kakehashi, Momentum-Dependent Local-Ansatz Wavefunction from Weak to Strong Electron Correlations, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2012) 013701 1-4 (DOI: 10.7566/JPSJ.82.013701), 査読有。
- (4) M. A. R. Patoary and Y. Kakehashi, Momentum-Dependent Variational Approach to Correlated Electron System, J. Phys.: Conf. Ser. **391** (2012) 012164 1-4 (DOI:

- 10.1088/1742-6596/391/1/012164), 査読有.
- (5) M. A. R. Patoary and Y. Kakehashi, Momentum-Dependent Local-Ansatz Approach to Correlated Electron Systems: Non Half-Filled Case, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 114708 1-11 (DOI: 10.1143/JPSJ.80.114708), 査読有.
- (6) T. Tamashiro, S. Nohara, K. Miyagi, and Y. Kakehashi, Quantitative Aspects of the Dynamical CPA in Harmonic Approximation, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 064702 1-9 (DOI: 10.1143/JPSJ.80.064702), 査読有.
- (7) Y. Kakehashi and M. A. R. Patoary, Ferromagnetism of transition metals and screened exchange interactions, Phys. Rev. B **83** (2011) 144409 1-9 (DOI: 10.1103/PhysRevB.83.144409), 査読有.
- (8) Y. Kakehashi and M. A. R. Patoary, First-Principles Dynamical Coherent Potential Approximation Approach to the Ferromagnetism of Fe, Co, and Ni, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 034706 1-10 (DOI: 10.1143/JPSJ.80.034706), 査読有.
- (9) Y. Kakehashi, M. A. R. Patoary, and T. Tamashiro, Dynamical coherent potential approximation approach to excitation spectra in 3d transition metals, Phys. Rev. B **81** (2010) 245133 1-13 (DOI: 10.1103/PhysRevB.81.245133), 査読有.
- (10) Y. Kakehashi, T. Nakamura, and P. Fulde, Non local theory of excitations applied to the Hubbard model, J. Phys. Conf. Series **200** (2010) 012075 1-4 (DOI:10.1088/1742-6596/200/1/012075), 査読有.
- (11) Y. Kakehashi, T. Tamashiro, M. A. R. Patoary, and T. Nakamura, First-principles dynamical CPA to finite-temperature magnetism of transition metals, J. Phys. Conf. Series **200** (2010) 032030 1-4, (DOI: 10.1088/1742-6596/200/3/032030), 査読有.

[学会発表] (計 3 1 件)

- (1) 内田尚志, 梯 祥郎, 第一原理分子動力学理論による Mn₃Pt の磁気構造と電子状態の温度依存性の解析, 日本物理学会, 2013年3月28日, 広島大学.
- (2) 梯 祥郎, 遍歴系における長距離非局所動的 CPA 理論, 日本物理学会, 2013年3月28日, 広島大学.
- (3) S. Chandra, 梯 祥郎, First-Principles Dynamical CPA investigation for Ferro- and Antiferro-magnetic Transition Metals, 日本物理学会, 2013年3月26日, 広島大学.
- (4) M. A. R. Patoary, 梯 祥郎, Momentum

Dependent Local-Ansatz Hybrid Wavefunction to Correlated Electron System, 日本物理学会, 2013年3月26日, 広島大学.

(5) M. A. R. Patoary, 梯 祥郎, Variational Theory with Momentum-Dependent Parameters to Strongly Correlated Electron System, 日本物理学会, 2012年9月19日, 横浜国立大学.

(6) Y. Kakehashi, M. A. R. Patoary, and S. Chandra, Nonlocal Excitations and 1/8 Singularity in Cuprates, International Conference on Magnetism, 2012年7月13日, 釜山 (Korea).

(7) T. Uchida and Y. Kakehashi, First-Principles Molecular Dynamics Study on the Magnetic Structure of Mn₃Pt, International Conference on Magnetism, 2012年7月10日, 釜山 (Korea).

(8) Y. Kakehashi and S. Chandra, First-Principles Dynamical CPA Study of Ferro- and Antiferromagnetism of Transition Metals, International Conference on Magnetism, 2012年7月10日, 釜山 (Korea).

(9) M. A. R. Patoary and Y. Kakehashi, Theory of Momentum-Dependent Variational Ansatz to Strongly Correlated Electron System, International Conference on Magnetism, 2012年7月9日, 釜山 (Korea). (他 2 2 件)

[図書] (計 1 件)

(1) Y. Kakehashi, Modern Theory of Magnetism in Metals and Alloys (Springer Series in Solid-State Sciences, Vol. 175), ISBN 978-3-642-33400-9, (Springer, Heidelberg, 2013) pp. 1-345.

[産業財産権] ○出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ:
<http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/wiki/index.php?Kakehashi%20Lab>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梯 祥郎 (KAKEHASHI YOSHIRO)
琉球大学・理学部・教授
研究者番号: 10191975