

## 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 5 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008～2012

課題番号：20102005

研究課題名（和文）巨大振幅原子振動がもたらす新しい電子相の動的分光法による研究

研究課題名（英文）Spectroscopic studies on novel electronic phase due to large amplitude atomic oscillations

研究代表者

藤 秀樹 (TOU HIDEKI)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60295467

研究成果の概要（和文）：カゴ状物質における基底状態を明らかにするため NMR, 超音波, ラマン散乱, 放射光 X 線散乱, 中性子非弾性散乱実験を行った. (1) I 型クラスレートゲストイオンラットリングは 20-30K の特性エネルギーを持ち, ゲスト原子の可動長と関係する. 強い電子-格子相互作用は種々の物理量の増大をもたらす. (2)  $RO_4Sb_{12}$  の重い電子的な振る舞いは伝導電子と最低基底状態, すなわちラットリング状態か結晶場状態と関係する. (3)  $SmRu_4P_{12}$  の秩序状態は磁気八極子によって説明できる. (4) 希土類ヘキサボライトでのフォノン異常は強い電子-格子相互作用によって引き起こされている. (5)  $RT_2Zn_{20}$  の構造相転移は電子格子相互作用に起因したラットリング転移である. また  $PrIr_2Zn_{20}$  において, ラットリング転移は抑えられ, 低温で反強四極子秩序が生じる.

研究成果の概要（英文）：NMR, ultrasonic, Raman scattering, X-ray scattering, and inelastic neutron scattering experiments were carried out to clarify the properties of the ground state in caged compounds. (1) The rattling motions of guest atoms in type -I clathrates correspond to the characteristic temperature scale of 20-30 K, and strongly interact with conduction electron states. Significant electron-local phonon coupling leads to enhancement of various physical quantities. (2) The heavy fermion behavior in  $RO_4Sb_{12}$  is attributed to the correlation between the conduction electrons and the lowest energy excitation, either rattling state or crystal electric field (CEF) state. (3) The primary order parameter of  $SmRu_4P_{12}$  is found to be an octupole  $T^\alpha$ , or  $T^\beta$ . (4) Phonon anomalies in  $GdB_6$  and  $DyB_6$  are expected to be caused by strong electron-phonon interaction. (5) The structural phase transition observed in  $RT_2Xn_{20}$  is attributed to rattling transition due to the strong electro-phonon coupling. In  $PrIr_2Zn_{20}$ , the rattling transition is suppressed and the antiferroquadrupolar ordering occurs at  $T_Q$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	33,200,000	9,960,000	43,160,000
2009年度	29,500,000	8,850,000	38,350,000
2010年度	32,200,000	9,660,000	41,860,000
2011年度	18,100,000	5,430,000	23,530,000
2012年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
総計	128,800,000	38,640,000	167,440,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：ラットリング, 重い電子系化合物, 電子・格子相互作用, 磁性, 超伝導

## 1. 研究開始当初の背景

物質中の電子分布と結晶格子を強く結合さ

せた系における新物性の発現が最近の研究から次々と明らかとなっている. 構造相転移や異方的電子軌道を伴う金属-絶縁体転移,

マルチフェロイック物質での磁性と強誘電性の同時発現、局在フォノン-電子間引力がもたらす超伝導などに代表され、電子-格子相互作用の動的性質は新奇物性発現における重要なパラダイムである。比較的容易に扱える調和近似による電子-格子相互作用とそれがもたらす物性は確立されているが、調和近似を超えて電子運動まで巻き込む非調和ポテンシャル中で、大きな電場揺らぎをもたらす巨大振幅の原子振動「ラットリング」による電子相の物性は未解明である。このようなラットリングの起きる系としてカゴ状構造化合物（カゴ状物質）がある。H15～19年度の特定期域研究「充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開」において、 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  などでは電荷揺らぎが大きく磁氣的異常の見られない電子質量の増強が指摘された。またカゴ構造をもつ  $\text{KOs}_2\text{O}_6$  などのパイロクロアや  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$  などのクラスレートにおける超伝導や熱電性能へのラットリング効果が注目されている。様々な分光実験からラットリング特性周波数が議論され、今、総合的に解明する段階を迎えている。

## 2. 研究の目的

調和近似を超えて大きく揺らぐ電場を発生する非調和ポテンシャル中の巨大振幅原子振動「ラットリング」によって出現する新しい電子相とラットリングが電子物性へ及ぼす効果について、複数の測定手段による横断的なスペクトロスコーピー実験の連携から統一的理解を与える。ラットリングは THz の振動から MHz の緩和現象までのエネルギー階層構造をもつ電子-格子相互作用の新しい側面をもたらす。特に (1) ラットリングのエネルギー階層構造 (2) 重い電子状態形成への効果 (3) 超伝導対形成機構との関連 (4) 金属-絶縁体転移などの新奇現象を解明する。加えて、室温以上の非調和フォノンの散乱による熱伝導率低下の機構を明らかにし、熱電素子など機能性物質の設計指針を得る。

## 3. 研究の方法

代表者と分担者はそれぞれが得意とする手法を用いて、以下のテーマに対し他の班と協力して物性研究を進めた。

役割分担

- (1) 核磁気共鳴 (NMR) を用いた MHz 領域のマイクロ研究 (藤)
- (2) 超音波を用いた MHz 領域マクロ研究 (鈴木, 連携研究者・根本)
- (3) ラマン分光を用いた GHz~THz 領域のスペクトロスコーピー (宇田川)
- (4) 放射光 X 線分光による GHz~THz 領域のダイナミクスの時空相関研究 (筒井, 連携研究者・Baron, 連携研究者・宇留賀)

(5) 中性子散乱分光による GHz~THz 領域のダイナミクスの時空相関研究 (岩佐・李)

## 4. 研究成果

### (1) クラスレート化合物の熱伝導抑制

$\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$  は、キャリアが n 型の場合には結晶的な格子熱伝導率を示し、p 型では熱伝導率が抑制される。両者の違いはラマン散乱スペクトルの  $E_g$  スペクトル (図 1 中 \* 印) に現れ、ピーク強度が n-型で増強される。一方、 $T_{2g}$  では両者の差が無いことから、カゴを形成する 6c サイトの Ga とゲスト  $\text{Ba}^{2+}$  間の相互作用が重要であることを明らかにした。n 型 (p 型) では 6c サイトの振動振幅が大きい (小さい) ことに対応し、Ba ゲストイオンの非中心振動が抑え込まれ (増強される) ことを意味する。また、非中心距離が 6c カゴ原子の振幅で決まることを明らかにした。このことは、格子熱伝導率抑制にはゲストの非中心運動だけでなく、ゲスト振動と相関したカゴ振動が重要であることを明らかにした (宇田川)。

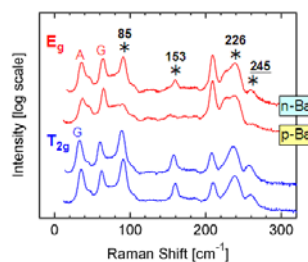


図 1 type-I BGS のラマンスペクトル。\* は Ba とカゴの相互作用に起因したピーク

### (2) クラスレート化合物の電子格子相互作用

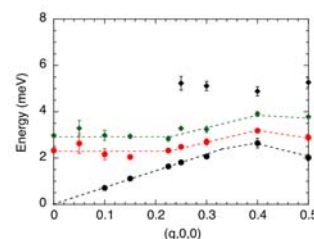


図 2 フォノンエネルギーの波数依存性

Type-I クラスレート  $\text{A}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$  ( $\text{A} = \text{Ba}, \text{Sr}$ ) 及び  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$  などの中性子散乱実験から、図 2 に示すように低エネルギーの光学フォノン ( $E = 2 \sim 5$  meV) を見出した。これらのゲストモードは音響フォノンと anti-crossing し、希土類原子と周りの格子との結合力は極めて弱く、充填原子の自由空間が大きいほどゲストモードのエネルギーは低くなる。つまり、大きなカゴ内で非常に緩く束縛された希土類原子が大きく振動している。また、ゲストモードは弱い分散を示し、コヒーレント光

学フォノンモードである。このことは、ゲストモードと音響フォノンが衝突するウムクラップ過程が低熱伝導度の起源を考える上で重要であることを示唆し、ラマン散乱の結果と一致する (李)。

非中心ラットリング系である type-I の n 型と p 型の  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$  の超音波測定では、図 3 に示した  $C_{44}$  モードの特徴的なソフト化と、20 K 付近以下でのハード化が見られた。一方、 $(C_{11}-C_{12})/2$  モードではソフト化は見られない。type-VIII  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$  の超音波実験では、降温とともに全ての弾性率は単調にハード化する。 $C_{44}$  のソフト化はラマン散乱実験で観測された立方対称既約表現で  $\Gamma_5$  ( $T_{2g}$ ) 歪みに対応しており、このモードのソフト化は非中心ラットリングによるものである。また、type-I  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$  でみられたモードによらない超音波分散は、デバイ型の緩和に活性エネルギー  $E$  を持つ熱活性型の緩和時間  $\tau$  の温度依存性を仮定して、相関時間  $\tau_0 = 6.0 \times 10^{-11}$  s と熱活性ギャップ  $E = 32$  K を得。この値は比熱で得られたアインシュタイン振動数と同程度であり、ラマン散乱や NMR の結果とも一致する。モードによらない超音波分散は、強い電子-格子相互作用に起因することがわかった。また、1 K 以下極低温で弾性率のモード依存しない僅かなソフト化を観測し、起源として Ba 原子の量子トンネリング状態が示唆される (鈴木)。

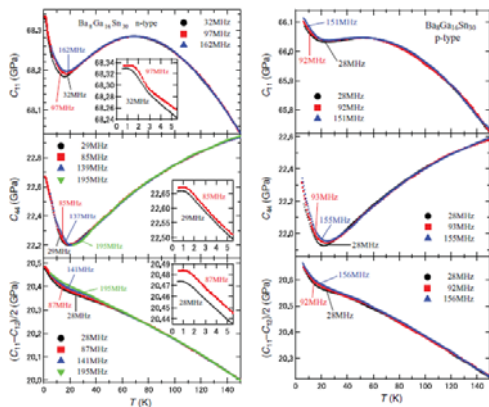


図 3 n 型, p 型 type I BGS の弾性定数の温度依存性。

type-I および type-VIII  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$  の核スピン格子緩和率  $1/T_1$  は 1 K 以上四重極緩和に近く、電気的な揺らぎが生じている。type-VIII の  $1/T_1T$  はコリンハ則に従う一方、type-I は 10 K 付近にピークを示す。また、緩和率は単純な BPP モデルでは説明できず、フォノンダンピングおよびソフト化に寄与する電子-格子相互作用が重要である。更に、極低温で NMR 緩和率は周波数依存し、これを Ba イオンのトンネル現象と考えて見積もったトンネル周波数は  $\nu_T = 478$  MHz と得られメスbauer実験で見積もられた  $\text{Eu}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$

のトンネル周波数 450 MHz とよく一致する。従って、クラスレート系の比熱係数から見積もった有効質量の増大は極低温での内包原子の量子トンネル状態と関係していると言える (藤)。

### (3) $\text{PrO}_4\text{Sb}_{12}$ の重い電子状態

$\text{Sb-NMR}$  の磁場依存性の実験から、少なくとも 15 K 以下の温度では Sb 核スピン格子緩和機構は磁気的であることが明らかとなり、また、NMR シフトおよび核スピン格子緩和率の磁場依存性が八極子揺らぎによるものであることが明らかになった。このことより、 $\text{PrO}_4\text{Sb}_{12}$  における重い電子の機構は、ラットリングやトンネリングではなく、結晶場励起による重い電子状態であることが強く示唆される (藤)。

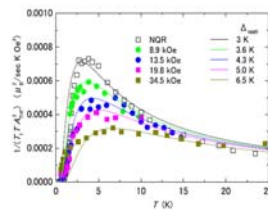


図 4  $\text{PrO}_4\text{Sb}_{12}$  の Sb-NMR 緩和率の種々の磁場での温度依存性。実線は結晶場励起による緩和を表す。

### (4) 充填スクッテルダイトの電子格子相互作用

充填スクッテルダイト  $\text{RO}_4\text{Sb}_{12}$  の X 線非弾性散乱により伝導電子とゲストモード間の電子-格子相互作用の存在を明らかにした。この電子-格子相互作用の大きさを示すゲストモードの線幅の希土類依存性から (図 5)、ゲストモードが最も低い素励起の場合に線幅と電子比熱係数に相関があることを見出した。このことは、結晶場励起とゲストモード励起のエネルギー大小関係が重い電子状態への寄与を決定していることを示唆する。中性子非弾性散乱でも  $\text{RT}_4\text{Sb}_{12}$  ( $R = \text{Ce}, \text{Pr}, \text{T} = \text{Ru}, \text{Os}$ ) のゲストモードに普遍的なソフト化を見出した。近藤半導体に近い性質を示して  $f$  電子自由度が抑制された Ce 系と、明瞭な結晶場準位を示す局在  $f$  電子自由度をもつ Pr 系では異なる電子-格子間相互作用のため、フォノンソフトニング率に差が生じる。さらに、 $\text{RFe}_4\text{Sb}_{12}$  において 100 K 以下でモードによらない顕著な超音波分散を見つけ、混成にかかわる結合係数が重要であることを明らかにした。 $\text{RFe}_4\text{Sb}_{12}$  では、キャリアと相互作用する低エネルギー光学フォノンと音響フォノンが重要であることを明らかにした。これは、前述の type-I  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$  でも得られた結果であり、モードによらない超音波分散は、電子-格子相互作用が強いことを示唆する。



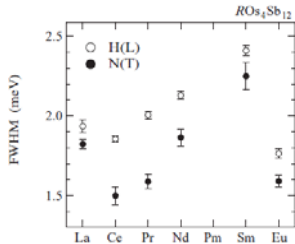


図5 X線非弾性散乱によるゲストモード線幅の希土類依存性（分光器の分解能は1.5meV）。

(5) 大振幅非調和振動に誘起された価数揺動

SmO<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>における重い電子の振舞いや価数揺動の発現機構について、X線非弾性散乱を用いて研究した。ゲストモードの線幅が価数変化の特性温度以下で急激に減少し、伝導電子とゲストモード間の電子-格子相互作用が低温で弱まることが明らかになった。この結果に加えて、以前に報告した構造やSm価数の温度変化の結果を考慮すると、本研究によって三宅らによって提案された大振幅非調和振動による価数揺動の理論的モデル（Tanikawa-Miyake: JPSJ）が証明され、重い電子状態にはラットリングのみではなく、価数揺動状態も関与していることが明らかとなった。加えて、圧力下X線吸収実験により価数における特性温度と重い電子的振舞いの間に相関があることを明らかにした。これは量子臨界点近傍における近藤温度と電子比熱係数の関係によく似ており、価数による量子臨界性の可能性を示すものである。

(6) YB<sub>6</sub> の非調和フォノンと超伝導

AB<sub>6</sub>では、B<sub>6</sub>クラスターの作る立方体の体心にRイオンが位置し、多極子が逐次相転移する物質群として注目されてきた。一方、Rイオンの比較的に大振幅の振動が指摘されていたが、直接的な証拠はなかった。

YB<sub>6</sub>は7.5 K以下で超伝導に相転移し、トンネル測定及び光電子分光の先行研究から強結合超伝導体で、8 meVの格子振動が重要と報告された。しかし実際にどのような格子振動が超伝導出現に関与しているのかわかっていなかった。ラマン散乱により対称性は立方晶より低下し、正方晶のF4/mmmの可能性が高く、低エネルギーに見られるラマンピークは、温度低下とともにそのエネルギーが低下する非調和振動であることを明らかにした。これを確認するX線非弾性散乱で、コーン異常によると考えられるエネルギーの低下がブリアンゾーン境界のX点で見られた。更に低温では非調和性によるエネルギーの低下も見られた。一方高圧下のラマン散乱測定の結果、8~10 GPaでYの振動が調和振動

に変化することを得た。今後超伝導転移温度の圧力依存性を測定し、超伝導消失と非調和性の消失の相関が得られれば、YB<sub>6</sub>がゲスト原子の非調和振動による超伝導体と結論できる。

(7) GdB<sub>6</sub>, DyB<sub>6</sub>の硼素カゴ中希土類イオンの非調和大振幅振動と電子-格子相互作用

GdB<sub>6</sub>, DyB<sub>6</sub>の硼素カゴ中における希土類イオンの非調和大振幅振動と電子-格子相互作用をX線非弾性散乱により研究した。図6に示した・X方向の6 meV程度に希土類イオン振動が主要なフォノン分散があり、X点(1/2, 0, 0)近傍の縦波モードがソフト化を示す。また・M方向の(0.38, 0.38, 0)近傍のモードでKohn異常などを明らかにした。これらは過去に軽希土類AB<sub>6</sub>では報告されておらず、前述のYB<sub>6</sub>も含めてイオン半径が小さい希土類イオン系での特徴である。長谷川ら（宇田川G）による第一原理計算では、イオン半径の小さい希土類の場合、直接的な原子間相互作用が抑制され、金属AB<sub>6</sub>に特徴的なフェルミ面に起因する電子-格子相互作用が相対的に顕著になることが示唆され、観測された非調和モードが説明できる。

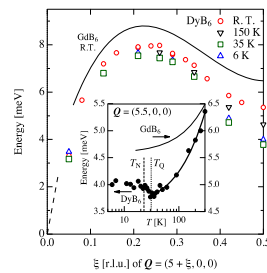


図6 GdB<sub>6</sub>とDyB<sub>6</sub>のゲストモードフォノン分散関係とX点縦波モードの温度依存性。

(8) RT<sub>2</sub>X<sub>20</sub>系化合物

超音波測定から、PrRh<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>, PrIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>ではラットリングに起因すると考えられる超音波分散を観測し、強い電子-格子相互作用が明らかとなった。LaIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>, LaRu<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>のLa-NMRからTs以下では線幅の広がりとともにスペクトルに構造を観測した。この結果Laサイトの局所的対称性がTdより低下していることが明らかとなった。関連して、中性子非弾性散乱による結晶場スペクトルより、PrRh<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>では空間群が低温相でTに変化することを見出した。この局所対称性低下の原因はZn(1)のdisplacementであることが長谷川等のバンド計算からわかった。一方、核スピン格子緩和率1/T<sub>1</sub>より、強い電子-格子相互作用が示唆され、ラットリング転移のドライビングフォースとなっていると予想される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者  
には下線)

[雑誌論文] (計 158 件)

- ①I. Ishii, T. Suzuki (8 番目), Y. Nemoto (11 番目), 他 9 名: “Antiferroquadrupolar ordering and magnetic-field-induced phase transition in the cage compound  $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$ ”, Phys. Rev. B 査読有, 87, 205106/1-7, 2013. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.205106
- ②H. Matsuno, H. Tou (8 番目), 他 6 名, “Ising-Type Magnetic Anisotropy Derived by  $\Gamma_7^{(1)}$  Crystal Electric Field Ground State in Tetragonal  $\text{CeRu}_2\text{Al}_2\text{B}$ :  $^{11}\text{B}$  and  $^{27}\text{Al}$  NMR Studies”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有 Jpn 81, 073705 (4 pages), 2012, DOI: 10.1143/JPSJ.81.073705
- ③S. Tsutsui, 他 7 名, “Pressure-Temperature Phase Diagram of Sm Valence State in a Heavy Fermion Compound  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 82, 023707/1-4, 2013. DOI: 10.7566/JPSJ.82.023707.
- ④I. Ishii, T. Suzuki (7 番目), 他 8 名: “Lattice instability and elastic dispersion due to the rattling motion in the type-I clathrate  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$ ”, Phys. Rev. B 査読有, 85, 085101/1-7, 2012. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.085101
- ⑤S. Tsutsui, A. Q. R. Baron (4 番目), T. Uruga (7 番目), M. Udagawa (13 番目), 他 10 名, “Atomic Dynamics of Low-Lying Rare-Earth Guest Modes in Heavy Fermion Filled Skutterudites  $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$  (R: Light Rare-Earth)” Phys. Rev. B, 査読有, 86, 195115/1-13, 2012. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.195115
- ⑥K. Asaki, H. Kotegawa, H. Tou, 他 4 名: “NMR Evidence of Freezing of Rattling Motion in  $\text{LaIr}_2\text{Zn}_{20}$  and  $\text{LaRu}_2\text{Zn}_{20}$ ” J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 81, 023711/1-4, 2012. DOI: 10.1143/JPSJ.81.023711
- ⑦I. Ishii, T. Suzuki (6 番目), 他 4 名: “Magnetic Field-Temperature Phase Diagram of the Ferro-quadrupolar State and Crystal Electric Field Effect in  $\text{UCu}_2\text{Sn}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 81, 024602/1-5, 2012. DOI: 10.1143/JPSJ.81.024602.
- ⑧H. Lee, S. Tsutsui, 他 3 名: “Study of Neutron Diffraction on  $^{154}\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  Single Crystal” J. Phys. Soc. Jpn. 81, 査読有, 063702 /1-4, 2012. DOI: 10.1143/JPSJ.81.063702
- ⑨K. Iwasa, M. Udagawa (10 番目), S. Tsutsui (11 番目), and A. Q. R. Baron (121 番目), 他 8 名: “Renormalized Motion of Dysprosium Atoms Filling Boron Cages of  $\text{DyB}_6$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 81, 113601/1-4, 2012. DOI: 10.1143/JPSJ.81.113601
- ⑩T. Suzuki, 他 7 名: “Emergence of elastic softening in  $\text{Sr}_8\text{Ga}_{16}\text{Si}_{30-x}\text{Ge}_x$  with increasing Ge concentration” J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 80, SA038/1-3, 2011. DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA038
- ⑪H. Tou, 他 6 名: “NMR Studies of  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$  Clathrates” J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 80, SA039/1-3, 2011. DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA039
- ⑫K. Iwasa, 他 7 名: “Softening of phonon by filled rare-earth ion motion common to skutterudite with Sb cages”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 80, SA032/1-3, 2011. DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA032
- ⑬H. Tou, H. Kotegawa (6 番目), 他 6 名: “Possible Mass Enhancement by Multipole Fluctuations Excited via the Singlet-Triplet Crystal Electric Field States in  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Sb-NMR Studies Using a Single Crystal”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 80, 074703/1-17 2011. DOI: 10.1143/JPSJ.80.074703
- ⑭K. Iwasa, K. Saito, and L. Hao.: “New Aspects of Electronic Ordered States due to  $f^2$  Configuration of Pr-Based Systems”, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 査読有, SB019/1-4, 2011. DOI: 10.1143/JPSJS.80SB.SB019
- ⑮K. Iwasa, S. Tsutsui (12 番目), A. Q. R. Baron (14 番目), 他 11 名: “Motion of the guest ion as precursor to the first-order phase transition in the cage system  $\text{GdB}_6$ ”, Phys. Rev. B 84, 査読有, 214308/1-6, 2011. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.214308.
- ⑯H. Bando, M. Udagawa (4 番目), 他 4 名: “Raman Scattering of  $\text{YB}_6$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 80, SA053/1-3, 2011. DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA053
- ⑰I. Ishii, Y. Nemoto (10 番目), T. Suzuki (12 番目), 他 9 名: “Antiferro-Quadrupolar Ordering at the Lowest Temperature and Anisotropic Magnetic Field-Temperature Phase Diagram in the Cage Compound  $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 80, 093601/1-4, 2011. DOI: 10.1143/JPSJ.80.093601
- ⑱Y. Takasu, M. Udagawa (4 番目), 他 5 名: “Off-center rattling and cage vibration of the carrier-tuned type-I clathrate  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$  studied by Raman scattering” Phys. Rev. B 査読有, 82, 134302/1-7, 2010. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.134302.
- ⑲I. Ishii, T. Suzuki (8 番目), 他 6 名: “Ultrasonic Dispersion in All Elastic

Moduli and Softening at Low Temperatures in Filled Skutterudite  $\text{LaFe}_4\text{Sb}_{12}$ ” J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 78, 084601/1-5, 2009. DOI: 10.1143/JPSJ.78.084601

⑩K. Iwasa, K. Saito, Y. Murakami, and H. Sugawara: “Electronic hybridization effect on 4f electron crystal field states of  $\text{PrOs}_4\text{P}_{12}$ ”, Phys. Rev. B 査読有, 79, 235113 /1-6, 2009. DOI:10.1103/PhysRevB.79.235113

[学会発表] (計 367 件)

①H. Tou, H. Kotegawa 他,  $^{15}\text{N}$ -NMR studies of layered nitride superconductor  $\text{Li}_x\text{ZrNCl}$ , International Union of Materials Research

Societies-International Conference of Electronic Materials 2012, 2012/09/24 (招待講演) 横浜市

②李 哲虎, 木方 邦宏 他, Neutron Scattering Study of Spin Fluctuations in Hole-Overdoped  $\text{KFe}_2\text{As}_2$ , 1st Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering (1st AOCNS) 2011 年 11 月 21 日 (招待講演), つくば市

③T. Suzuki, Searching for a hidden order parameter at a novel phase transition in cage compound  $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$  by an ultrasonic technique, V Russian-Japanese Seminar “Molecular and Biophysical Magnetoscience”, 2010/09/15 (Plenary, 招待講演) Orenburg, Russia

④筒井智嗣, 元素選択的フォノン研究のプローブとして: 中性子・X線非弾性散乱との比較, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 24 日, シンポジウム招待講演, 大阪府立大学

⑤宇田川眞行, I 型クラスレートにおける非中心ラットリング運動, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 24 日シンポジウム招待講演, 大阪府立大学

[図書] (計 1 件)

N. A. スポルディン, S.-W. チョン, R. ラメシュ 鈴木孝至 訳, マルチフェロイックの歴史と展望(パリティ)2011, p. p. 30-38

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

①名称: Pressure detection apparatus, Josephson device, and superconducting quantum interference device that include superconductor thin film that undergoes transition from superconductor to insulator by pressure  
発明者: 鈴木孝至 権利者: 広島大学  
種類: 国際出願 (米国)

番号: US 8, 338, 821 B2  
取得年月日: 2012 年 12 月 25 日  
国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ等

[http://www.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~wdweb/Tou\\_top.html](http://www.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~wdweb/Tou_top.html)

<http://www.heavy-electrons.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤 秀樹 (TOU HIDEKI)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 60295467

(2) 研究分担者

①鈴木 孝至 (SUZUKI TAKASHI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授

研究者番号: 00192617

(3) 研究分担者

②宇田川 眞行 (UDAGAWA MASAYUKI)

広島大学・大学院総合科学研究科・教授

研究者番号: 70144889

③岩佐 和晃 (IWASA KAZUAKI)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 00275009

④李 哲虎 (LEE CHUL-HO)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・主任研究員

研究者番号: 80358358

⑤筒井 智嗣 (TSUTSUI SATOSHI)

(財) 高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門非弾性散乱チーム・副主幹研究員

研究者番号: 70360823

(7) 連携研究者

①根本 祐一 (NEMOTO YUICHI)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 10303174

②アルフレッド バロン (Alfred Baron)

独立行政法人理化学研究所・バロン物質ダイナミクス研究室・准主任研究員

研究者番号: 90442920

③宇留賀 朋哉 (URUGA TOMOYA)

(財) 高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門 分光物性 I グループ・副主席研究員

研究者番号: 70241255