

## I 4f 多電子状態を有する希土類化合物の核磁気共鳴

NMR study of rare-earth based materials with multi-4f electron configurations

水戸 毅・上田光一・小山岳秀

Mito, T., Ueda, K., Koyama, T.

希土類を含む化合物の中でも Sm や Eu 系等の化合物が示す特異な物性を、核磁気共鳴 (NMR) と核四重極共鳴 (NQR) 測定によって調べている。SmB<sub>6</sub> は、最も古くから知られる価数揺動物質であるが、近年 6~10 GPa 以上の高圧下で磁気秩序を伴う絶縁体-金属転移を示すことが明らかになり、<sup>11</sup>B-NMR 信号を約 6 GPa まで測定することに成功した。EuPtP は、温度変化に対して二度の価数転移を示す珍しい物質であり、<sup>31</sup>P-NMR 測定によって、これらの転移による秩序構造を明らかにすることができた。また、SmS は圧力誘起価数転移を起こす物質であるが、<sup>33</sup>S の NMR 測定により、半導体相のギャップの大きさを調べた。

## II 多極子秩序系の核四重極共鳴、核磁気共鳴

NMR and NQR studies on multipolar ordering systems

水戸 毅・上田光一・小山岳秀

Mito, T., Ueda, K., Koyama, T.

電氣的・磁氣的多極子秩序を示すと考えられる化合物について、NQR と NMR を用いた研究を行なっている。これまでスクッテルダイト化合物 SmRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub> や六方晶構造の YbAl<sub>3</sub>C<sub>3</sub> において成果が得られてきたが、昨今は主に U 系化合物 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> が T<sub>O</sub>=17.5 K で示す「隠れた秩序」によって対称性がどのように変化するかを調べている。現段階では、対称性変化の直接的な実験証拠は得られていないが、四重極共鳴周波数の温度変化が T<sub>O</sub> で異常を示すなど、これまで検出されていない現象が観測されている。

## III イッテルビウム系強相関化合物における 非磁性-磁性転移の研究

Study of nonmagnetic-magnetic transition in ytterbium-based  
strongly correlated electron systems

水戸 毅・上田光一・小山岳秀  
Mito, T., Ueda, K., Koyama, T.

イッテルビウム (Yb) を含む強相関電子系化合物における非磁性-磁性転移の研究は、Ce 系化合物との比較においても大変興味深い。我々は圧力や磁場によってこの相転移近傍をチューニングし、NMR、NQR を中心とした測定を行なった。具体的な対象物質は  $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ 、 $\text{YbCu}_5$ 、 $\text{YbPtSb}$  等、低温で大きな比熱を示す物質で、測定の結果これらの物質における  $f$  電子の局在-遍歴性に関する情報が得られた。

## IV 重い電子系超伝導体の核磁気共鳴、核四重極共鳴

NMR and NQR studies of heavy Fermion superconductors

水戸 毅・上田光一・小山岳秀  
Mito, T., Ueda, K., Koyama, T.

重い電子系超伝導の発生機構を解明するため、以前からの  $\text{UPt}_3$ 、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$ 、 $\text{UPd}_2\text{Al}_3$  での Pt、Si、Al 核等の NMR、Ru、Pd の NQR に加え、最近報告された  $\text{CePt}_3\text{Si}$  の Pt、Si の NMR を行ない、ナイトシフト、核スピン格子緩和時間の温度変化を測定している。特に 1 K 以下の低温における NMR、NQR 測定を中心にして研究を行なっている。

## V 遍歴電子磁性体の NMR/NQR

NMR/NQR study of itinerant electron magnet

水戸 毅・上田光一・小山岳秀  
Mito, T., Ueda, K., Koyama, T.

主に  $3d$  電子に起因する磁性体の性質は、「磁性金属では電子間の交換相互作用によって著しく増強されたスピンの揺らぎが存在し、それが物質の熱力学的性質を支配する」という考えによって説明できる。半導体  $\text{FeSb}_2$  についてはその電子状態を、 $\text{Rh}_{17}\text{S}_{15}$  は  $4d$  電子間の相関と超伝導特性を研究している。また、インド工科大学との共同研究で、soft ferromagnetic material である  $\text{FeCuSb}$  の内部磁場の測定を行なっている。

## VI 複数の相転移をもつ物質での核磁気共鳴

NMR study of materials with multiple phase transitions

水戸 毅・上田光一・小山岳秀  
Mito, T., Ueda, K., Koyama, T.

希土類を含む金属間化合物（例えば  $\text{RE}_5\text{T}_4\text{X}_{10}$ 、 $\text{RE}_2\text{T}_3\text{X}_5$ ; RE=希土類、T=遷移金属、X=Si 又は Ge）では、電荷密度波（CDW）、スピン密度波（SDW）、超伝導転移等のうち複数の相転移が、温度を変えていくと同一物質内で起こる。特に各構成原子についてのフェルミ面での電子の状態密度の測定に重点をおいて NMR 測定を行なっている。

## VII 幾何学的フラストレート系の磁性

Magnetism of geometrically frustrated systems

水戸 毅・上田光一・小山岳秀  
Mito, T., Ueda, K., Koyama, T.

磁性原子が2次元三角格子や3次元パイロクロア格子を組む幾何学的フラストレーションをもつ化合物の物質探索を行い、それらが示す異常現象、たとえば金属絶縁体転移や磁気転移の機構を解明するための研究を行なっている。特に金属相（遍歴電子磁性体）での幾何学的フラストレーションの効果に着目している。実験手法としては、核磁気共鳴や中性子散乱などをはじめとした様々な手段を用いている。

### 発表論文 List of Publications

- I-1** K. Nishiyama, T. Mito, G. Pristáš (Slovak Acad. Sci.), Y. Hara, T. Koyama, K. Ueda, T. Kohara, Y. Akahama, S. Gabáni (Slovak Acad. Sci.), M. Reiffers (Slovak Acad. Sci.), K. Flachbart (Slovak Acad. Sci.), H. Fukazawa (千葉大院理), Y. Kohori (千葉大院理), N. Takeshita (産総研), N. Shitsevalova (Natl. Acad. Sci. Ukraine): NMR Investigation of Pressure Effect on Intermediate Valence Compound  $\text{SmB}_6$ , J. Phys. Soc. Jpn. Conf. Proc. **3**, 011085 1-6 (2014)
- I-2** T. Mito, K. Nishitani, T. Koyama, H. Muta, T. Maruyama, G. Pristáš (Slovak Acad. Sci.), K. Ueda, T. Kohara, A. Mitsuda (九大院理), M. Sugishima (九大院理), H. Wada (九大院理): NMR studies of ordered structures and valence states in the successive valence-transition system  $\text{EuPtP}$ , Phys. Rev. B **90**, 195106-1-6 (2014)
- I-3** T. Koyama, T. Maruyama, K. Ueda, T. Mito, A. Mitsuda (九大院理), M. Umeda (九大院理), M. Sugishima (九大院理), H. Wada (九大院理): Zero-field NMR and NQR studies of magnetically ordered state in charge-ordered  $\text{EuPtP}$ , Phys. Rev. B **91**, 094419-1-4 (2015)

- I-4** T. Koyama, H. Yamada, K. Ueda, T. Mito, Y. Haga (原子力機構先端基礎): NMR study of black-phase in SmS, *J. Phys.: Conf. Ser.* **592**, 012027-1-4 (2015)
- I-5** 江見直哉・西山功兵・原由希子・水戸毅・G. Pristáš (Slovak Acad. Sci.)・小山岳秀・上田光一・小原孝夫・S. Gabáni(Slovak Acad. Sci.)・K. Flachbart (Slovak Acad. Sci.)・深澤英人(千葉大院理)・小堀洋(千葉大院理)・竹下直(産総研)・小山内湧人(茨大院理工)・林健人(茨大院理工)・伊賀文俊(茨大理)・N. Shitsevalova (Natl. Acad. Sci. Ukraine): SmB<sub>6</sub>における圧力依存性と置換効果II、日本物理学会 2014 年秋季大会(中部大学)、2014
- I-6** 丸山丈博・小山岳秀・上山藤乃・上田光一・水戸毅・光田暁弘(九大院理)・喜舎場英吾(九大院理)・杉島正樹(九大院理)・和田裕文(九大院理): 価数転移を示す Eu 化合物の磁気秩序状態における NMR 測定、日本物理学会 2014 年秋季大会(中部大学)、2014
- I-7** 小山内湧人(茨大院理工)・菊地翔弥(茨大理)・伊賀文俊(茨大理)・水戸毅・佐藤桂輔(茨城高専): 価数揺動系 Sm<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>B<sub>6</sub>(R=Yb<sup>2+</sup>, La<sup>3+</sup>, Zr<sup>4+</sup>)における組成と価数・エネルギーギャップの相関、日本物理学会 第 70 回年次大会(早稲田大学)、2015
- I-8** 山田陽彦・小山岳秀・上田光一・水戸毅・芳賀芳範(原子力機構先端研): SmS の圧力下 NMR 測定、日本物理学会 第 70 回年次大会(早稲田大学)、2015
- II-1** T. Mito, H. Hara, T. Ishida, K. Nakagawara, T. Koyama, K. Ueda, T. Kohara, K. Ishida (京大理), K. Matsubayashi (物性研), Y. Saiga (物性研), Y. Uwatoko (物性研): Low-Temperature Intermediate Valence State in YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>, *J. Phys. Soc. Jpn. Conf. Proc.* **3**, 011065 1-6 (2014)
- II-2** T. Koyama, H. Yamada, T. Shimosaka, H. Hara, K. Ueda, T. Mito, T. Kohara, A. Slebarski (Silesia 大): Sb NQR Study in Kondo Insulator CeRh<sub>1-x</sub>Pd<sub>x</sub>Sb System, *J. Phys. Soc. Jpn. Conf. Proc.* **3**, 011020 1-5 (2014)
- III-1** Y. Iwamoto (神大院海事), T. Akazawa (神大院海事), K. Ueda, NMR Study of YbGaGe, *J. Phys. Soc. Jpn. Conf. Proc.* **3**, 017007 1-5 (2014)
- III-2** 中山大將・小山岳秀・上田光一・水戸毅・辻井直人(物材機構): Yb 系価数揺動物質の NMR/NQR 測定、日本物理学会 2014 年秋季大会(中部大学)、2014
- IV-1** 服部泰佑(京大理)・杉本大輔(京大理)・軽部皓介(京大理)・石田憲二(京大理)・出口和彦(名大理)・佐藤憲昭(名大理)・山村朝雄(東北大金研)・水戸毅: 強磁性超伝導体 UCoGe における強磁性ゆらぎの圧力変化、日本物理学会 第 70 回年次大会(早稲田大学)、2015
- V-1** 上田光一・小山岳秀・水戸毅・小原孝夫・G.S. Thakur (インド工科大)・Z. Haque (インド工科大)・L.C. Gupta (インド工科大)・A.K. Ganguli (インド工科大): 軟質な強磁性体 CuFeSb の NMR による研究、日本物理学会 2014 年秋季大会(中部大学)、2014

- V-2** 上田光一・小山岳秀・水戸 毅・小原孝夫・G.S. Thakur (インド工科大)・Z. Haque (インド工科大)・L.C. Gupta (インド工科大)・A.K. Ganguli (インド工科大)：軟質な強磁性体 CuFeSb の NMR による研究 II、日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学)、2015
- VI-1** Y. Kawasaki (徳島大工), R. Morioka (徳島大工), Y. Kishimoto (徳島大工), K. Nakamura (徳島大工), K. Nishiyama, T. Koyama, T. Mito, T. Baba (物性研), T. Yamauchi (物性研), M. Isobe (マックスプランク研), Y. Ueda (豊田理化学研),  $^{51}\text{V}$ -NMR study of low-temperature phase in  $\delta\text{-Ag}_{2/3}\text{V}_2\text{O}_5$ , J. Phys.: Conf. Ser. **592** 012042-1-6 (2015)
- VI-2** 森岡 亮 (徳島大工)・川崎 祐 (徳島大工)・岸本 豊 (徳島大工)・中村浩一 (徳島大工)・西山功兵・小山岳秀・水戸 毅・磯部正彦 (マックスプランク研)・上田 寛 (豊田理化学研)：バナジウムブロンズ  $\text{Ag}_{2/3}\text{V}_2\text{O}_5$  における金属絶縁体転移の NMR による研究 II、日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学)、2015
- VI-3** K. Ueda, T. Koyama, T. Mito, T. Kohara, NMR Studies of Quasi-one-dimensional Compound  $\text{Lu}_2\text{Ir}_3\text{Si}_5$ , J. Phys. Soc. Jpn. Conf. Proc. **3**, 015025 1-6 (2014)
- VI-4** 上田光一・竹村真哉・小山岳秀・水戸 毅・小原孝夫：CDW と超伝導を示す物質の電子状態についての NMR による研究 III、日本物理学会 2014 年秋季大会 (中部大学)、2014

## 大学院物質理学研究科

### 博士前期課程

- 江見直哉 :  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の隠れた秩序相における不純物の影響の研究
- 三木俊宙 :  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の構造対称性に関する微視的研究
- 中山大將 : NMR, NQR から見る中間価数物質 Yb 系化合物の温度依存性
- 丸山文博 : 価数転移を示す  $\text{EuPtP}$  の NMR による研究
- 山田陽彦 : 濃縮  $^{33}\text{S}$  を用いた NMR による  $\text{SmS}$  の物性研究

## 科学研究費補助金等

- 1 文部科学省科学研究費補助金 (平成 24~26 年度) 基盤研究 (C) 課題番号:24540349  
研究課題 核四重極相互作用を用いた局所対称性と電子状態研究の新しい手法  
研究代表者 水戸 毅
- 2 文部科学省科学研究費補助金 (平成 26~27 年度) 若手研究 (B) 課題番号:26800193  
研究課題 希土類化合物における圧力誘起絶縁体-金属転移現象の微視的研究  
研究代表者 小山岳秀
- 3 ひょうご科学技術協会学術研究助成 (平成 26 年度)  
研究課題 希土類化合物で起こる絶縁体金属転移の核磁気共鳴法による機構解明  
研究代表者 小山岳秀