

研究課題別評価

1. 研究課題名：赤外磁気光学イメージングによる局所電子構造

2. 研究者氏名：木村 真一

3. 研究の狙い：

磁性体などの物質は、低温で磁気相転移や構造相転移、超伝導転移が生じ、物質の性質（物性）が大きく変わる。その起源となっているのが物質中の電子の状態である。電子は一つの状態に1つの電子しか存在できないために、電子が存在できる最大のエネルギーがあり、フェルミ準位と呼ばれている。磁性や伝導などの物性は、そのフェルミ準位の極近傍の電子状態が支配している。そこで、その電子状態の情報が得られれば、物性を担っている電子の性質がわかるはずである。特に、各種の相転移では電子状態の変化がきっかけになって起こっているものがあり、相転移の起源である電子状態を特定することは極めて重要である。このように、物質の状態が相転移によって変革する過程をフェルミ準位極近傍の電子状態の変化としてつぶさに観測できれば、極めて重要な情報が得られると考えられる。

そのような観点から、フェルミ準位極近傍の電子状態を個別に励起できる赤外分光に着目した。特に相転移の途中で生じる相分離の状態は、極めて面積が小さく、顕微鏡的な観察が必要である。そのために、本研究では「赤外磁気光学イメージング」という実験手法を開発した。この装置は、シンクロトロン放射光（大型放射光施設 SPring-8）からの赤外線の高輝度性と円偏光性を使い、顕微鏡分光と円偏光二色性を組み合わせて、磁場中の顕微赤外磁気光学分光および特定の構造に着目してイメージングを行うというものである。このことで、磁性体などの相転移途中の電子状態の変化を空間的に軌道モーメントを分離して調べることができる。

4. 研究結果：

本研究では、まず世界最高輝度のシンクロトロン放射光であるSPring-8に赤外線を利用するビームラインを建設した。その結果、実験室で通常使われている黒体輻射光源に比べて100倍程度高い輝度が得られた。また、空間分解能は波長程度（波長10μmの光で10μm程度）まで絞り込むことができた。このような光を効率よく超伝導マグネット中の試料に導く光学系を設計・製作し、これまで測定が難しかった微小試料や微小な領域の顕微赤外磁気光学測定を可能にした。

この装置を用いて、擬二次元有機超伝導体κ-(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Brの電子状態を調べた。この物質は、直径1mm以下の小さな試料しか育成できず、磁場中での光学スペクトルの測定は不可能であった。また、この物質は、磁場中や中間の温度では試料中で超伝導と金属・絶縁体の状態が共存している相分離が起こっていると考えられている。本研究で開発した装置を用いることで、このような微小な領域からのスペクトルの測定が可能であるばかりでな

く、それらを空間的に分離して可視化（イメージング）する測定も可能である。実際に、相分離に由来すると思われる光学スペクトルの空間分布はごく最近観測できており、本装置を使うことで初めて可能になる研究がスタートした。

将来的には高圧セルも導入し、低温・高磁場・高圧下での赤外分光によって、多重極限環境下での電子状態の研究を遂行する予定であり、その基盤となる方法論が確立した。このことは、多重極限環境下で現れる特異な物性の起源を調べる上で極めて重要な研究になる。

5. 自己評価：

本研究では、世界最高スペックの放射光 SPring-8 に新しい赤外ビームラインを作り、そこで得られる高輝度赤外線と高い磁場を組み合わせた装置を作り、固体の分光研究を行うということが主題であった。その中では、高輝度な光を効率よく集める鏡など、いくつかの R & Dを行い、試行錯誤の末にゴールにほぼたどり着けたものと思う。また、磁場中での顕微赤外分光は最近ではいくつかのグループで行われはじめており、本研究者が先鞭をつけたものであるといえる。

本研究期間内で、研究課題名にあるように「イメージング」までたどりつくことが目標であったが、不幸にもビームラインの故障などのトラブルがあったために、期間中にデータを出すことができず、期間終了直後に最初のデータを得ることができた。

今後は、これまで研究が不可能であった領域である多重極限環境下の電子状態を調べる研究を進めていきたい。

6. 研究総括の見解：

シンクロトロン放射科学は、基礎科学と工学のほとんど全ての分野にわたり高度の学際性と汎用性を特徴とする分野である。その潜在的可能性を開拓するには、電子加速器という大型設備に付随した用途限定的手法の技術開拓が不可欠となる。本研究者は、物質の相転移現象研究に有効性を発揮する赤外磁気分光と微量試料の顕微イメージング技術の開発を目標として、本領域に参加した。シンクロトロン放射の強力赤外ビームを集光し、高磁場のもとで顕微分光を行うという野心的発想は国際的にも注目されていたが、3年にわたり単身で研究を遂行する過程では、当然ながら多くの技術的難問が続出し、さらにビーム・ライン故障など不測の障害にも遭遇した。しかし、幸い研究期間の終了近くにほぼ目標の技術開発を達成することができた。日本放射光学会・若手奨励賞受賞(2001)などその努力と成果は研究期間の間にも広く国際的に認められていて、“さきがけ”研究者の優れた特質を内外に示した成果として高く評価できる。今後、この技術を駆使した物性研究の進展を期待したい。

7. 主な論文等：

発表論文 解説記事

S. Kimura, H. Iwata, K. Kanai, S. Shin, G. Schmerber, J.P. Kappler and J.C. Parlebas, "Collapse of

- Kondo Lattice in $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Pd}_3$ ($x = 0, 0.03$), *Physica B* (in press).
- J. Sichelschmidt, V. Voevodin, S. Paschen, W. Carrillo-Cabrera, Yu. Grin, F. Steglich and S. Kimura, "Optical reflectivity of the clathrate compound $\text{Ba}_6\text{Ge}_{25}$ ", *Physica B* (in press).
- S. Kimura, T. Nishi, T. Takahashi, T. Hirano, Y. Ikemoto, T. Moriwaki and H. Kimura, "Infrared Spectroscopy under Extreme Conditions", *Physica B* (in press).
- S. Kimura, M. Okuno, H. Iwata, H. Kitazawa, G. Kido, F. Ishiyama and O. Sakai, "Optical and Magneto-Optical Studies on Electronic Structure of CeSb in the Magnetically Ordered States", *J. Phys. Soc. Jpn.* 71 (2002) (in press).
- S. Kimura, T. Nishi, M. Okuno, H. Iwata, H. Aoki and A. Ochiai, "Charge Ordering Effect of Electronic Structure of $\text{Yb}_4(\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x)_3$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* 71 Suppl. p. 300 (2002).
- S. Kimura, M. Okuno, H. Iwata, T. Saitoh, T. Okuda, A. Harasawa, T. Kinoshita, A. Mitsuda, H. Wada and M. Shiga, "Temperature-Induced Valence Transition of $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.25}\text{Ge}_{0.75})_2$ Studied by Eu 4d-4f Resonant Photoemission and Optical Conductivity", *J. Phys. Soc. Jpn.* 71 Suppl. p. 255 (2002).
- H. Okamura, M. Matsunami, S. Kimura, T. Nanba, F. Iga and T. Takabatake, "Optical conductivity of diluted Kondo semiconductors $\text{Yb}_{1-x}\text{Lu}_x\text{B}_{12}$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* 71 Suppl. p. 303 (2002).
- S. O. Hong, B. H. Min, H. J. Lee, S. Kimura, M. H. Jung, T. Takabatake and Y. S. Kwon, "Influence of electronic structure of $\text{CeSbNi}_{0.15}$ on its optical conductivity", *Physica B* 312-313, 251 (2002).
- H. Okamura, M. Matsunami, S. Kimura, T. Nanba, F. Iga, T. Takabatake, "Optical gap in the diluted Kondo semiconductors $\text{Yb}_{1-x}\text{Lu}_x\text{B}_{12}$: lattice and single-site effects", *Physica B* 312-313, 157 (2002).
- H. Okamura, T. Koretsune, M. Matsunami, S. Kimura, T. Nanba, H. Imai, Y. Shimakawa, Y. Kubo, "Magneto-optical study of the colossal magnetoresistance pyrochlore $\text{Ti}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$ ", *Physica B* 312-313, 714 (2002).
- S. Kimura, M. Okuno, H. Iwata, H. Kitazawa and G. Kido, "Low-Energy Electronic Structure of $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Sb}$ ($x = 0, 0.1$) in the Magnetically Ordered States", *Physica B* 312-313, 228 (2002).
- S. Kimura, M. Okuno, H. Iwata, T. Nishi, H. Aoki and A. Ochiai, "Low-Energy Optical Conductivity of Yb_4As_3 ", *Physica B* 312-313, 356 (2002).
- T. Kinoshita, H. P. N. J. Gunasekara, Y. Takata, S. Kimura, M. Okuno, Y. Haruyama, N. Kosugi, K. G. Nath, H. Wada, A. Mitsuda, M. Shiga, T. Okuda, A. Harasawa, H. Ogasawara and A. Kotani, "Spectroscopy Studies of Temperature-Induced Valence Transition Material $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ around Eu 3d-4f, Eu 4d-4f and Ni 2p-3d Excitation Regions", *J. Phys. Soc. Jpn.* 71, 148 (2002).
- H. Okamura, T. Koretsune, M. Matsunami, S. Kimura, T. Nanba, H. Imai, Y. Shimakawa and Y. Kubo, "Charge dynamics in the colossal magneto-resistance pyrochlore $\text{Ti}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$ ", *Phys. Rev. B*

- 64, 180409(R) (2001).
- S. Kimura, M. Okuno, H. Iwata, H. Aoki and A. Ochiai, "Temperature Dependence of Low-Energy Optical Conductivity of $\text{Yb}_4(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_3$ ($x = 0, 0.05, 0.15$)", J. Phys. Soc. Jpn. 70, 2829 (2001).
- 木村洋昭, 木村真一, 岡村英一, 篠田圭司, 森脇太郎, 福井一俊, 櫻井誠, 難波孝夫, "SPring-8 赤外物性ビームライン - BL43IR - の建設", 放射光 14, 250 (2001).
- S. Kimura, H. Kimura, T. Takahashi, K. Fukui, Y. Kondo, Y. Yoshimatsu, T. Moriwaki, T. Nanba and T. Ishikawa, "Front end and optics of infrared beamline at SPring-8", Nucl. Instrum. Meth. A 467-468, 437 (2001).
- S. Kimura, T. Nanba, T. Sada, M. Okuno, M. Matsunami, K. Shinoda, H. Kimura, T. Moriwaki, M. Yamagata, Y. Kondo, Y. Yoshimatsu, T. Takahashi, K. Fukui, T. Kawamoto and T. Ishikawa, "Infrared spectromicroscopy and magneto-optical imaging stations at SPring-8", Nucl. Instrum. Meth. A 467-468, 893 (2001).
- H. Kimura, T. Moriwaki, N. Takahashi, H. Aoyagi, T. Matsushita, Y. Ishizawa, M. Masaki, S. Ohishi, H. Okuma, T. Nanba, M. Sakurai, S. Kimura, H. Okamura, N. Nakagawa, T. Takahashi, K. Fukui, K. Shinoda, Y. Kondo, T. Sata, M. Okuno, M. Matsunami, R. Koyanagi and Y. Yoshimatsu, "Infrared beamline at SPring-8: design and commissioning", Nucl. Instrum. Meth. A 467-468, 441 (2001).
- H. Okamura, M. Matsunami, T. Inaoka, T. Nanba, S. Kimura, F. Iga, S. Hiura, J. Klijn, T. Takabatake, "Optical conductivity of $\text{Yb}_{1-x}\text{Lu}_x\text{B}_{12}$: Energy gap and mid-infrared peak in diluted Kondo semiconductors", Phys. Rev. B 62, R13265 (2000).
- S. Kimura, F. Arai and M. Ikezawa, "Optical Study on Electronic Structure of Rare-Earth Sesquioxides", J. Phys. Soc. Jpn. 69, 3451 (2000).
- S. Kimura, H. Kitazawa, G. Kido and T. Suzuki, "Optical and magneto-optical studies on magnetic phase transition of CeSb and CeBi", Physica B 281-282, 449 (2000).
- H. Okamura, T. Inaoka, S. Kimura, T. Nanba, F. Iga, S. Hiura and T. Takabatake, "Energy gap evolution in the optical spectra of Kondo alloy system $\text{Yb}_{1-x}\text{Lu}_x\text{B}_{12}$ ", Physica B 281-282, 280 (2000).
- H. Okamura, J. Kawahara, T. Nanba, S. Kimura, I. Shimoyama, K. Nakagawa, K. Soda, U. Mizutani, Y. Nishino, M. Kato, K. Fukui, H. Miura and H. Nakagawa, "Pseudogap formation in the intermetallic compounds $(\text{Fe}_{1-x}\text{V}_x)_3\text{Al}$ ", Phys. Rev. Lett. 84, 3674 (2000).
- S. Kimura, H. Kitazawa, G. Kido and T. Suzuki, "Electronic structure in the magnetically ordered states of CeSb studied by magneto-optical spectroscopy in the infrared region", J. Phys. Soc. Jpn. 69, 647 (2000).
- 木村真一, "赤外域の円偏光放射光の利用 - 赤外磁気円偏光二色性 - ", 放射光 13, 62 (2000).
- S. Kimura, "Infrared Magnetic Circular Dichroism of Strongly Correlated 4f Electron Systems

with Synchrotron Radiation", Jpn. J. Appl. Phys. 38 Suppl. 38-1, 392 (1999).

招待講演

木村真一, '赤外放射光の利用の現状と将来', 第14回 日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (2001年1月, 広島大学)

木村真一, '赤外放射光の利用研究', 第11回 名古屋大学NSSRシンポジウム (2001年6月, 名古屋大学).

S. Kimura, 'Optical and magneto-optical studies on strongly correlated electron systems with low carrier concentration', Festkörperphysikalisches Kolloquium, Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe (2001年8月, Dresden, Germany).

T. Nanba, S. Kimura, H. Okamura, M. Sakurai, M. Matsunami, H. Kimura, T. Moriwaki, Y. Ikemoto, T. Hirano, T. Takahashi, K. Shinoda, K. Fukui, M. Teragami and Y. Kondo, 'Infrared synchrotron radiation in Japan', 26th International Conference on Infrared and Millimeter Wave, (2001年10月, Toulouse, France)

受賞

木村真一, 日本放射光学会 第5回若手奨励賞 (2001年1月).