

モット転移近傍の異常な金属状態

「場と反応」領域 井上 公

1. 研究のねらい・目的

自由電子近似という概念がある。固体物理で電子論を勉強するとき最初に学ぶ事柄である。金や銅などの大部分の“普通の”金属の物性は、本来ならば電子どうしに働くはずのクーロン相互作用を全く無視しても十分に説明できるのだという教えである。この教えはフェルミ流体論というものによって敷衍される。フェルミ流体論によれば、電子どうしに働く相互作用がいかに強くなっても、電子は相互作用という衣をまとうだけで、あたかも独立の（つまり互いに相互作用しない）粒子のように振る舞うというのだ。以下でこの衣のことを「有効質量」と呼んで議論する。さらに、どうして物質には金属や絶縁体といったものがあるのかという問題は、バンド理論という概念によって説明される。これも固体物理のまさに根幹をなす事柄である。シリコンをはじめとする半導体（バンド理論で言うところの絶縁体）にキャリアをドーピングするとどうなるかということにまつわる基本的な問題は、このバンド理論によってほとんど理解されたといってよい。この理解が、現在驚異的な発展を遂げた半導体エレクトロニクスへの応用を支えているということは、いまさら強調するまでもないだろう。

ところが、ここに「強相関電子系」と呼ばれる一連の物質群がある。この「強相関」とよばれる電子系においては、こうした従来の固体物理学によるアプローチはいたるところで破綻してしまっている。この系の研究は古くにモット転移や重い電子などの物性研究として始まったわけなのだが、近年の実験技術の進歩は、この系に潜んでいた高温超伝導や巨大磁気抵抗などの驚くべき物性をつぎつぎと発掘し続けている。まさに固体物理の教科書は新たな分冊を書かなければならない段階に来たと言ってもおかしくない。バンド理論が半導体エレクトロニクスを産み出したように、固体物理の新分冊が『現時点では誰も想像すらできない』新世代の電子技術の幕を開くのではないかという期待は大きい。しかしながら、強相関電子系の研究にはまだまだ未開拓の部分が多く、問題の本質の所在すら明らかにされたとは言い難い状況である。例えば、モット転移の近傍の金属状態の問題である。

電子の運動エネルギーを十分に小さくしてやると、つまり電子の作る「バンド」の幅を十分に小さくすると、電子は次々に「相互作用」という名の重たい衣を着込んでいく。やがて

電子の重さ、つまり有効質量は発散的に増大し、全く動けなくなってしまう（この状態をモット絶縁体という）と予想されるが、このようにして金属がモット絶縁体へ転移することをモット転移と呼ぶ。古典的な金属電子論では説明できない現象である。しかし、モット転移の近傍の金属状態で本当に上のような平均場的な(局所的な)相互作用のくりこみのモデルが成り立っているのかということには疑問を持たざるをえない。平均場的な相互作用を考慮して定義した「準粒子」と呼ばれる素励起には、格子振動や、スピンの揺らぎ、さらにはスクリーニングされていない長距離クーロン力などによる非局所的な相互作用が働いているはずだからである。そこで、本研究で目的とした事は、実際に電子のバンド幅を化学的にコントロールできる物質の良質な単結晶を作製し、金属状態の物性とくに有効質量がどのように変化していくのかを包括的かつ系統的に追いかけて、さらに光電子分光や光学反射率などで準粒子のエネルギースペクトルを観測して、相互作用の非局所性についての情報を引き出すことである。ここでは幾つかの実験結果を紹介して、本研究の成果のまとめの報告を行う。

2. 研究成果

2.1 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ の構造と単結晶の作製

本研究においては、電気伝導や磁性について粒界や不純物に影響されない実験データを得ることが不可欠なので、そのためにも良質な単結晶を作製することが非常に重要である。まさに、この単結晶作製には最も力が注がれた。まず、ペロブスカイト型の「 $3d^1$ バナジウム酸化物」($3d^1$ とは、単位化学式あたり $3d$ 電子がひとつ存在するという意味)である $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ という新物質の設計を考え、実際に単結晶の作製に世界で初めて成功した。作製は、浮遊溶融帯方式 (Floating Zone 法) を用いて行った。また、酸素量を厳密に 3 に持っていく方法についても確立させた。詳細については投稿論文にて報告する。

この系の特徴は、 Sr^{2+} (イオン半径 1.27 \AA) を価数の等しい Ca^{2+} (イオン半径 1.06 \AA) で置換すると、V (バナジウム) イオンの形式的な価数 (V^{4+}) を保ったまま V-O-V の結合角 (ボンド角) のみを制御することができる点である。

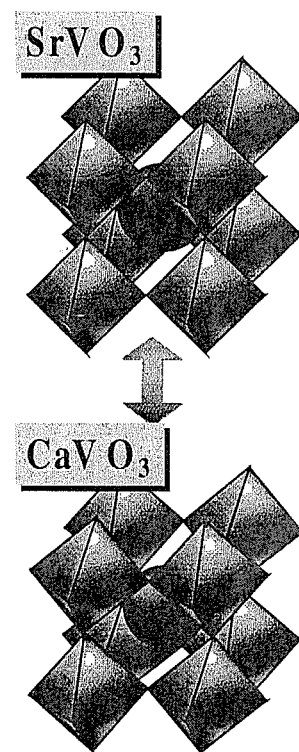


図1 ペロブスカイト構造

Ca_{1-x}Sr_xVO₃のV-O-Vボンド角は $x=1.0\sim 0.0$ の変化に伴い $180\sim 160^\circ$ まで変化する。これはSr²⁺をCa²⁺で置換することにより格子定数が小さくなりVO₆八面体が傾くからである。(図1)このとき、3dバンド幅 W が小さくなる。したがって x の値を1.0から0.0まで変えることによって、系の電子数を変えることなく、 W の値を12%も小さくできる。他の強相関電子系と呼ばれているTi系、Mn系、Ni系などのペロブスカイトでは、これ以下のバンド幅の変化に対しても系の物性が劇的に変化することがわかっている。Ca_{1-x}Sr_xVO₃と同じ構造で同じ3d¹遷移金属酸化物のLaTiO₃はモット絶縁体であることが知られているが、このLaTiO₃のTi-O-Tiボンド角はおよそ 160° である。CaVO₃ ($x=0.0$)のボンド角はLaTiO₃のボンド角とほとんど変わらないので、CaVO₃もモット絶縁体の近傍にあると考えてよいであろう。ところが実際にはCaVO₃は金属であるからCa_{1-x}Sr_xVO₃という物質はモット転移近傍の「金属状態」を研究するのにLaTiO₃よりもむしろ格好の舞台を提供してくれると期待される。

2.2 Ca_{1-x}Sr_xVO₃の帯磁率と比熱

帯磁率 χ の温度 T に対する変化をプロットしたものが図2である。 χ が低温で大きくなるが、この項をキュリーワイス則でフィットしてみると、およそ0.2%程度のV³⁺サイトの存在に起因するものであることがわかる。この程度のV³⁺サイトの出現は、非常に微妙な酸素欠損や、ディスロケーションなどによるわずかな格子欠陥からきており、以下に展開する電子状態の議論にはほとんど影響しないと考える。

ほとんど温度変化を示さない、いわゆる定数項については、金属状態であることを反映したパウリ常磁性、ランダウ反磁性のほかに、軌道常磁性、内殻の反磁性などの項があるが、幾つかの仮定のもとにパウリ常磁性以外の寄与を差し引くことができる。パウリ常磁性の項 χ_p は電子のフェルミレベルでの状態密度に比例する量なので、こうして実験から求めた χ_p の値(約 2×10^{-4} emu/mol)を、局所密度近似(Local Density Approximation: 以下LDAと略す)を用いたバンド計算から求めた値と比べることによって、この系の電子の有効質量 m^* とバンド質量 m_b の比を導き出せる。得られた m^*/m_b はおよそ3.2

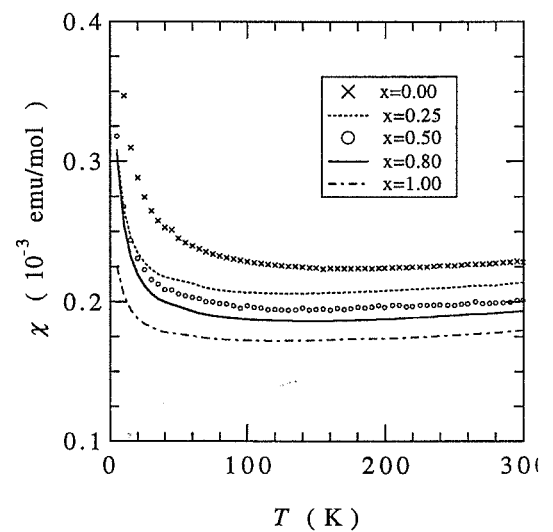


図2 Ca_{1-x}Sr_xVO₃の帯磁率の温度依存性

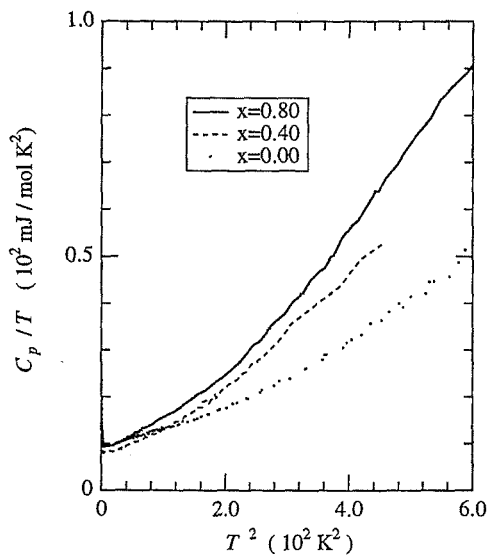


図3 Ca_{1-x}Sr_xVO₃の比熱の温度依存性

程度であり、SrVO₃ ($x=1$) から CaVO₃ ($x=0$) に向かって、つまりバンド幅が狭くなるにつれてゆるやかな増大を見せた。この結果については以下で改めて検討する。

等圧比熱 C_p の温度依存性は図3のようになる。低温で C_p は等積比熱 C_v にほぼ等しいので、

$C_p \approx C_v = \gamma T + BT^3$ の関係より電子比熱係数 γ の実験値が求まる。図3では C_p/T を T^2 に対してプロットしているの、縦軸の切片の値が γ に相当することになる。この実験から求められた γ の値は、

約 8 mJ/mol/K^2 程度である。この γ は χ_p と同様に、電子のフェルミレベルでの状態密度に比例する量

であるから、 γ の実験値を LDA を用いたバンド計算で求めた値と比べることによって、 m^*/m_b の値が導かれた。結果を、前述の χ_p から見積もった m^*/m_b の値と一併して図4にプロットした。

ここで、 χ_p から求めた有効質量の値と γ から求めた有効質量の値の比をウィルソン比とよぶ。ウィルソン比は通常の金属の場合 1 であるが、電子どうしに働く相互作用の影響が無視できなくなると、この値は 2 に近づく。 χ_p に強磁性的な寄与が現れないことや、基底状態の縮退がとけていることなどを前提にすれば、最も相関の強い極限でウィルソン比は 2 になる。そこで、 χ_p から求めた有効質量の値の半値と、 γ から求めた有効質量の値とを、図4で比べて見た。影を付けた部分程度のずれはあるがウィルソン比は x の値によらずほぼ 2 に等しい。これは Ca_{1-x}Sr_xVO₃ が強相関電子系であるということのひとつの証拠である

とあってよい。またここでは述べないが電気抵抗の温度変化から導かれる係数とこの $\chi_p/2$ の実験値とが門脇—ウッズの関係を満たしており、そのことも、この系において強い電子相関が働いていることを示唆している。

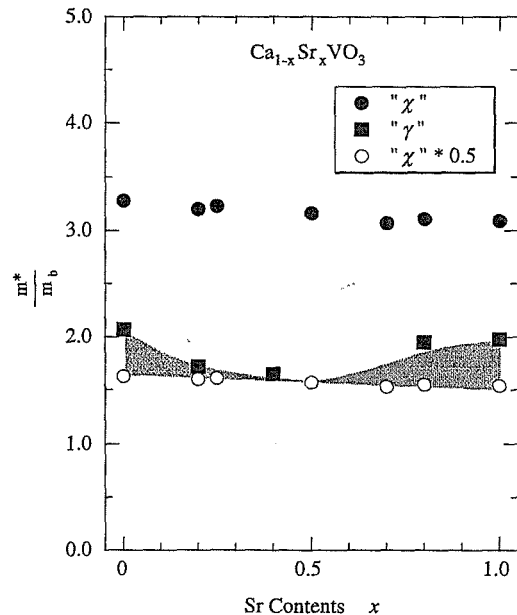


図4 有効質量の組成依存性

図4で影を付けた部分については、電子格子相互作用による γ の値の増強が考えられる。実際に電気抵抗の測定からも $x=0.5$ 付近で電子格子相互作用は最も弱くなるということが判明している。

この系には強い電子相関が存在しており、さらにボンド角を 160° まで大きく歪ませることができるので、 $x=0$ の CaVO_3 は、ほぼモット転移の近傍にあると推測できる。しかしながら、有効質量の値は CaVO_3 に向けて増大をみせない。ほとんど変化しないと言ってもいいほどである。電子どうしに働く相互作用が大きくなれば、電子は相互作用の重い衣を身に付けていって次第に重くなり、モット転移の直前においては有効質量は発散すると予想されるにもかかわらず、このような現象が見られているのは非常に興味深い。それではこうした相互作用の衣を着た準粒子のエネルギースペクトルはどのようなものになるのでしょうか。

2.3 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ の光電子スペクトル

一準粒子励起のエネルギースペクトルは、光電子分光法によって測定できる。光電子分光法とは、物質に光を照射して、飛び出してくる電子（光電子）のエネルギーを測定する実験手法である。照射した光のエネルギーはわかっているので、光電子が物質中でどれだけのエネルギーで束縛されていたかを知ることができる。そこで、その束縛エネルギー（ $-\omega$ ）を横軸に、飛び出してきた電子の数を縦軸にしてプロットしたものが（角度積分型）光電子スペクトル $\rho(\omega)$ である。自由電子近似が成り立つ場合には、 $\rho(\omega)$ はバンド計算で求めた電子の状態密度 $D(\omega)$ のフェルミエネルギー以下の部分（占有状態密度）を正確に反映すると考えられる。しかし、これはあくまでも電子が飛び出した後に残る正孔のポテンシャルが一瞬のうちにスクリーンされてしまうことを前提としているので、正孔が出来たことによって電子系が大きく状態を変えてしまう場合には、 $\rho(\omega)$ は $D(\omega)$ に一致しない。

つまり強相関電子系のように『ただか1個電子を動かしただけで、系全体のエネルギーが、電子どうしに働く相互作用の大きさ U に相当するぶんだけ大きく変わってしまう（基底状態の N 電子系 $\Psi(N)$ と励起状態の $N-1$ 電子系 $\Psi(N-1)$ に電子1個分の束縛

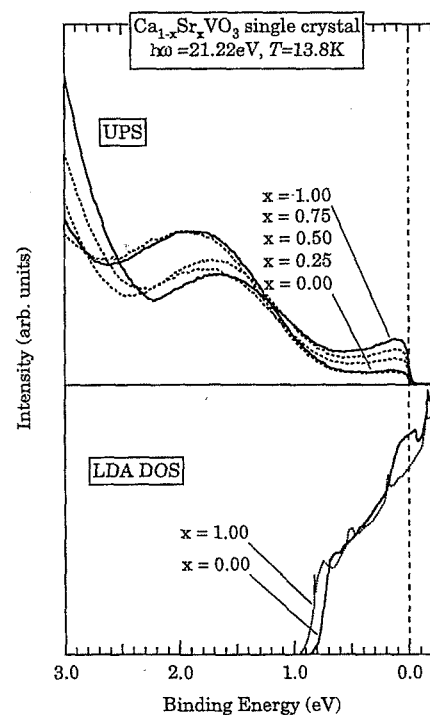


図5 光電子スペクトル（上）とバンド計算による状態密度（下）

エネルギーより大きなエネルギー差がある)』場合には、 $|\langle \Psi(N-1) | a | \Psi(N) \rangle|^2$ はもはや $D(\omega)$ を与えないのである。(ここで a は電子一個を消滅させる演算子。)

図5には測定した光電子スペクトルと、LDAを用いたバンド計算から得られる状態密度を比較してある。両者の間に大きな違いがあることは明らかである。このような大きなスペクトル強度の移動(この場合、フェルミエネルギー付近の強度が大きく減って、1.5eV付近に新たなピークが生じている)は、まさにこの系が強相関電子系であるということを裏付けるさらに雄弁な事実である。

また、バンド幅を小さくしていくと、つまり $\text{SrVO}_3 (x=1)$ から $\text{CaVO}_3 (x=0)$ に組成が変わるに連れて、スペクトル強度がフェルミエネルギー近傍から1.5eV付近のピークに系統的に移っていくのがわかる。モット絶縁体においてはフェルミエネルギーにはハバードギャップと呼ばれる大きさ U のギャップが開き、ギャップを挟んで下部ハバードバンドと上部ハバードバンドが形成される事が理論的にも実験的にも明らかにされているので、ここで金属相であるにもかかわらず見えている1.5eV付近のピークは下部ハバードバンドの「さきがけ (precursor)」であろうと考えられる。ひとつの物質系でハバードギャップが生成する様子を光電子分光で観測した例は、これが世界で初めてである。

フェルミレベル付近には、いわゆる相互作用を繰り込まれた準粒子のバンドが存在するはずだが、光電子スペクトルには幅の広い励起が観測されるだけで、分解能の範囲ではフェルミエネルギーのところに幅の狭い(つまり有効質量の大きい)準粒子のバンドは現れていない。

2.4 非局所的相互作用のモデル

電子相関が非常に強いにもかかわらず有効質量がそれ程大きな増大を見せていないという現象は、冒頭で述べたような単純なモット転移のモデルでは理解し難い。この現象を考察する鍵は「光電子スペクトルのフェルミエネルギー付近に幅の狭い準粒子バンドが現れていない」という観測結果に潜んでいる。モット転移近傍の金属相で一準粒子の励起スペクトルが変化していく様子を記述しうる代表的なモデルは、無限次元ハバードモデルの動的平均場近似である。このモデルは、金属相においてすでにハバードバンドのさきがけが出現するのだという我々の光電子分光の観測結果を的確に再現してくれるが、電子の感じる「場」は空間的に一様でゆらぎがないため、フェルミエネルギー (E_F) にある電子は相互作用の繰りこみを全く受けない。つまり $\rho(E_F) = D(E_F)$ が常に成り立っている。(図6)これがモット転移点での有効質量の発散的増大につながるわけである。しかし、我々の観測結果はむしろ、モット転移に近づくと $\rho(E_F)$ の値が徐々に小さくなっていくというものであった。つまり

準粒子バンドの幅が次第に広がっているように見える。

平均場的に相互作用を繰り込むモデルで無視されているのは相互作用の「場」の空間的なゆらぎである。これは「準粒子の自己エネルギーの波数依存性」を考えなければいけないということを意味している。平均場の範囲でもネスティングによるフェルミ面の不安定性を考慮すれば、自己エネルギーに波数依存性が現れるが、3次元系の場合には、それ以上に長距離クーロン相互作用による電子相関が効いてきていると考えられる。

一般に遷移金属酸化物においてはキャリアの濃度が小さく、電子の作るクーロンポテンシャルは十分にスクリーンされて短距離力になっているとは考えにくい。さらにモット転移近傍になるとキャリアは自由に動きまわりにくくなるのでスクリーニングの効果はますます小さくなると考えられる。実際に長距離クーロン相互作用のみの自己エネルギーを考えて光電子スペクトルを計算すると $\rho(E_F)$ の値がスクリーニングの度合に応じて小さくなり、有効質量も小さくなることがわかる。準粒子の波数依存性の起源としては他にも電子格子相互作用や、スピンゆらぎなどの効果が考えられるが、どのような効果が最も支配的なのかということについては今後の研究で明らかにする必要がある。

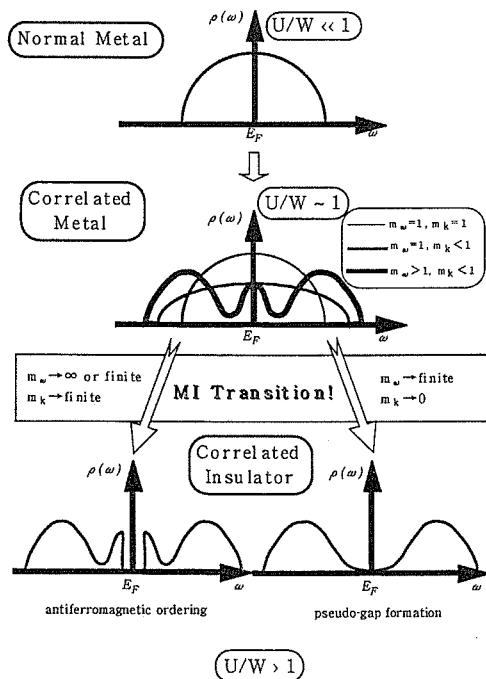


図7 自己エネルギーの波数依存性を導入することにより準粒子スペクトルが変化する様子の概念図

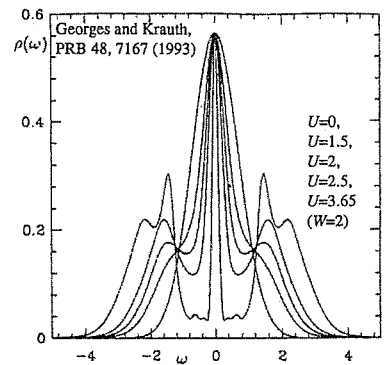


図6 無限次元ハバードモデルによる状態密度の計算結果

本研究では、相互作用に準粒子の波数依存性を現象論的に導入したモデルを使い、光電子スペクトルの解析を行った。モデルの概念図を図7に示す。図で m_ω と書かれた量は平均場的に繰り込まれうる相互作用の与える有効質量で、 m_k は自己エネルギーの波数依存性の与える有効質量である。実際の有効質量は m_ω と m_k の積で表される。このモデルは、スペクトル強度の変化を定量的に説明することに成功した。さらに、そこから導かれる有効質量の計算値が、実際に測定された有効質量の実験値およびその変化を良く説明することもわかった。

以上のことから、モット転移近傍での有効質量の振る舞いは、転移点ぎりぎりの臨界的な部分を

除き、必ずしも始めから発散的増大を示すわけではないことが証明された。これは従来の考え方に対して大きな問題提起をなすものである。

3. 今後の展開

今後は角度分解の光電子スペクトルを測定し、実際に相互作用（自己エネルギー）の形がどうなっているのかを求めることで、さらに興味深い展開が生まれると期待される。また、電荷移動型のNi系やMn系を除く系では純粋なバンド幅の制御のみで金属非金属転移を実現できていないので、物質の組成をさらに工夫することで、そのような転移をVペロブスカイトで実現させたい。さらに、熱伝導率やHall係数の組成変化の測定が必用であり、強磁場でのフェルミ面の測定や中性子の実験を行うことで非局所的な相互作用の起源についても、より明らかにしなくてはならないと考えている。

4. 関連発表論文リスト

論文

- 1) I. H. Inoue, Y. Aiura, Y. Nishihara, Y. Haruyama, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, J. G. Bednorz, and F. Lichtenberg, "Redistribution of the Spectral Intensity in a Layered 4d-Electron Superconductor Sr_2RuO_4 Observed by the Photoemission Spectroscopy.", *Physica B* **223&224**, 516 (1996)
- 2) I. H. Inoue, H. Makino, Y. Aiura, I. Hase, Y. Maeno, Y. Haruyama, S. Nishizaki, T. Fujita, Y. Nishihara, "Spectral weight redistribution in $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ and Sr_2RuO_4 ," *Czechoslovak Journal of Physics* **46**, 2699 (1996)
- 3) M. J. Rozenberg, I. H. Inoue, H. Makino, F. Iga, Y. Nishihara, "Low Frequency Spectroscopy of the Correlated Metallic System $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ ", *Physical Review Letters* **76**, 4781 (1996)
- 4) I. H. Inoue, Y. Aiura, Y. Nishihara, Y. Haruyama, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, J. G. Bednorz, and F. Lichtenberg, "Spectroscopic Manifestation of Mass Renormalization in Layered 4d-Electron Superconductor Sr_2RuO_4 ," *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **78**, 175 (1996)
- 5) H. Suzuki, H. Bando, Y. Ootuka, I. H. Inoue, T. Yamamoto, K. Takahashi, Y. Nishihara, "Superconductivity in single-crystalline $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ ", *Journal of the Physical Society of Japan* **65**, 1529 (1996)
- 6) I. H. Inoue, I. Hase, Y. Aiura, Y. Haruyama, Y. Nishihara, A. Fujimori, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, F. Lichtenberg, J. G. Bednorz, "Spectroscopic Manifestation of Mass Renormalization in

- Correlated d-Electron Metals, $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ and Sr_2RuO_4 ." in "Proceedings of Physical Phenomena at High Magnetic Field II" p519 (World Scientific, Singapore, 1996)
- 7) I. H. Inoue, H. Makino, I. Hase, Y. Aiura, Y. Haruyama, Y. Nishihara, "High-resolution and low temperature photoemission study on $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ single crystals." *Physica B***230-232**, 780 (1997)
 - 8) I. H. Inoue, Y. Haruyama, Y. Aiura, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, "Photoemission study on a layered 4d electron superconductor Sr_2RuO_4 " in "Advances in Superconductivity IX" ed. by S. Nakajima and M. Murakami, p165 (Springer-Verlag, Tokyo, 1996)
 - 9) I. H. Inoue, H. Makino, I. Hase, M. Ishikawa, N. E. Hussey, M. J. Rozenberg, "Systematic control of the electron correlation and an anomalous metallic state in $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ near the Mott transition.", *Physica B***237-238**, 61 (1997)
 - 10) H. Makino, I. H. Inoue, M. J. Rozenberg, F. Iga, Y. Aiura, S. Onari, "Optical spectra of the correlated metallic system $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ ", *Physica B***237-238**, 56 (1997)
 - 11) I. H. Inoue, O. Goto, H. Makino, N. E. Hussey, M. Ishikawa, "Band-width control in a perovskite-type 3d1 correlated metal $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$. I. Evolution of the electronic properties and effective mass.", submitted to *Physical Review B*.
 - 12) H. Makino, S. Onari, I. H. Inoue, M. J. Rozenberg, I. Hase, Y. Aiura, "Band-width control in a perovskite-type 3d1 correlated metal $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ II. Optical responses.", submitted to *Physical Review B*.

口頭発表

- 1) I. H. Inoue, "強相関電子系の光電子スペクトル～非局所的自己エネルギーと有効質量の現象論～", in 筑波大学「物性コロキウム」(つくば, 1995)
- 2) I. H. Inoue, "光電子スペクトルから見た電子相関と質量繰り込み：強相関d電子系 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ および Sr_2RuO_4 ", in 第22回超伝導マグネティクス専門研究会「物性物理における電子相関」(東京, 1995)
- 3) I. H. Inoue, "Spectroscopic manifestation of mass renormalization in a layered 4d-electron superconductor Sr_2RuO_4 .", in 第2回田中コンファレンス(浜松, 1995)
- 4) I. H. Inoue, "Spectroscopic Manifestation of Mass Renormalization in Correlated d-Electron Metals, $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ and Sr_2RuO_4 .", in International Conference of Physical Phenomena on High Magnetic Field II (Tallahassee, USA, 1995)
- 5) I. H. Inoue, Y. Aiura, Y. Nishihara, Y. Haruyama, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, J. G. Bednorz, and F. Lichtenberg, "Spectroscopic Manifestation of Mass Renormalization in Layered 4d-Electron Superconductor Sr_2RuO_4 ." in International Conference of Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (Tokyo, 1995)
- 6) I. H. Inoue, Y. Aiura, Y. Nishihara, Y. Haruyama, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, J. G. Bednorz, and F. Lichtenberg, "Redistribution of the Spectral Intensity in a Layered 4d-Electron Superconductor Sr_2RuO_4 Observed by the Photoemission Spectroscopy." in International

- Conference of Strongly Correlated Electron Systems (Goa, India, 1995)
- 7) H. Makino, I. H. Inoue, M. J. Rozenberg, F. Iga, Y. Nishihara, "強相関電子系 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ 単結晶の光学スペクトル" in 第51回日本物理学会年会 (金沢, 1996)
 - 8) H. Suzuki, H. Bando, Y. Ootuka, I. H. Inoue, T. Yamamoto, K. Takahashi, Y. Nishihara, " $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ 単結晶の超伝導" in 第51回日本物理学会年会 (金沢, 1996)
 - 9) I. H. Inoue, Y. Aiura, Y. Nishihara, Y. Haruyama, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, J. G. Bednorz, and F. Lichtenberg, "層状4d超伝導体 Sr_2RuO_4 における準粒子スペクトルと有効質量" in 第51回日本物理学会年会 (金沢, 1996)
 - 10) I. H. Inoue, H. Makino, Y. Aiura, Y. Haruyama, Y. Nishihara, "High-resolution and low temperature photoemission study on $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ single crystals." in International Conference of Strongly Correlated Electron Systems (Zurich, Switzerland, 1996)
 - 11) I. H. Inoue, H. Makino, Y. Aiura, Y. Haruyama, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, Y. Nishihara, "Effective mass and spectral weight redistribution in $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ and Sr_2RuO_4 ," in International Conference of Low Temperature Physics (Prague, Czech Rep., 1996)
 - 12) I. H. Inoue, H. Makino, Y. Aiura, I. Hase, Y. Haruyama, M. Ishikawa, N. E. Hussey, M. J. Rozenberg, F. Iga, "Systematic control of the electron correlation and an anomalous metallic state in $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ near the Mott transition." in International Conference on Physics of Transition Metals (Osaka, 1996)
 - 13) H. Makino, I. H. Inoue, M. J. Rozenberg, F. Iga, Y. Nishihara, S. Onari, "Optical spectra of the correlated metallic system $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ in International Conference on Physics of Transition Metals (Osaka, 1996)
 - 14) I. H. Inoue, Y. Haruyama, Y. Aiura, S. Nishizaki, Y. Maeno, T. Fujita, "Photoemission study on a layered 4d electron superconductor Sr_2RuO_4 " in International Symposium on Superconductivity (Sapporo, 1996)
 - 15) I. H. Inoue, H. Makino, I. Hase, Y. Aiura, Y. Haruyama, M. Ishikawa, F. Iga, N.E.Hussey, (M.J.Rozenberg, " $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ 単結晶における電子相関の制御とモット転移近傍の金属状態の変化" in 1996年日本物理学会秋の分科会 (山口, 1996)
 - 16) Y. Haruyama, Y. Aiura, H. Bando, I. H. Inoue, H. Suzuki, M. Fujisawa, S. Shin, Y. Nishihara, "劈開した SrTiO_3 表面の電子状態と表面構造の観察" in 1996年日本物理学会年会秋の分科会 (山口, 1996)
 - 17) I. H. Inoue, A. Kimura, A. Harasawa, A. Kakizaki, Y. Aiura, S. Ikeda, Y. Maeno, "Spectral Weight Redistribution in Layered 4d-Electron Superconductor Sr_2RuO_4 ," in International Conference of Spectroscopies in Novel Superconductors (North Falmouth, USA, 1997)
 - 18) I. H. Inoue, I. Hase, Y. Aiura, A. Kimura, A. Harasawa, A. Kakizaki, S. Ikeda, Y. Maeno, "光電子分光による Sr_2RuO_4 の電子状態の研究" in 1997年日本物理学会年会春の分科会 (神戸, 1997)