

戦略的創造研究推進事業

研究領域「新規材料による高温超伝導基盤技術」

研究課題「鉄プニクタイト系超伝導研究と物質開拓」

研究終了報告書

氏名 佐藤 正俊

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

(2010年4月- 名古屋大学・名誉教授)

(2010年4月-2011年3月 (財)豊田理化学研究所 フェロー)

(2011年4月- (財)総合科学研究機構 サイエンス コーディネーター)

§ 1. 研究実施の概要

(1) 実施概要

鉄系での超伝導機構が、新規なものかどうか注目して研究を進めてきた。銅酸化物等によく知られたスピン揺らぎ機構か、それとも多バンド系であることに由来した新しい機構かがその核心で、解明には、超伝導の対称性の決定が直接的である。逆格子空間内の点 Γ と M の周りにおける離れたフェルミ面上での超伝導オーダーパラメーター (Δ) が、異なる符号を持つ (S_{\pm} 対称性) ならスピン揺らぎ機構が、同一符号 (S_{++} 対称性) なら新規機構が働いていると言えるからである。名大佐藤グループは、この符号変化を反映する3種類の物理量、超伝導転移温度 T_c 等への不純物効果、中性子磁気非弾性散乱スペクトル $\chi''(Q, \omega)$ 、NMR 縦緩和率 $1/T_1$ を調べた。特に、不純物効果の実験結果を確立したほか、大型単結晶作成を通じた中性子散乱実験や NMR 測定の結果の考察を通して、 S_{++} 対称性が実現している可能性が高いことを示した。これは、新規な超伝導機構が存在することを指摘したことに当たる。

上記の研究結果に呼応して、軌道-格子結合を基本にした超伝導機構が、2グループから発表されたが、そのうちのひとつである新潟大野グループが、H22 年度の途中から当チームに加わった。そこでは、多バンド系の軌道揺らぎを考慮した理論研究が進められ、さらに超音波測定による格子系の実験的研究も後藤らによって実施された。この理論は、d電子系の電子間相互作用および電子軌道-格子結合の効果を取り入れたもので、超音波実験から得られた、構造相転移温度 T_S および超伝導転移温度 T_c まで続く弾性定数 C_{66} モードの巨大なソフト化や、電子ドープ系で常に $T_S > T_N$ (磁気秩序温度) となる実験からの相図を再現する。さらに、軌道揺らぎを媒介として S_{++} 波超伝導が実現することを示すものである。

上記の研究成果に基づき、鉄系で格子-軌道結合が新規な超伝導をもたらしている可能性をさらに深く追究すべく、それに関する多くの実験的証拠と理論的考察を進めた。静的秩序の無い超伝導体に対するこの作業は、決して容易なものではないが、中性子散乱実験や NMR 結果の考察から、間接的証拠の蓄積に加え、具体的でわかりやすい情報を得るための徹視の手がかりをすでにいくつか見出した段階に至っている。

(2) 顕著な成果

① 非磁性不純物による T_c 抑制速度の測定による S_{\pm} 対称性の識別

概要: S_{\pm} 対称性に対して見られるはずの、“非磁性不純物による超伝導対破壊効果”が見られないことを、特に La1111 系について最初の実験的に指摘し、多くが主張する S_{\pm} 対称性よりむしろ S_{++} 対称性の可能性が高いと結論付けた。さらに、磁気・輸送特性に関する多様な実験データを提出し、その結論を支持する傍証をも提示した。

② 中性子散乱や NMR、超音波測定による超伝導対称性の吟味

概要: 中性子散乱で見られる磁気励起スペクトル $\chi''(Q, \omega)$ や、NMR $(1/T_1)-T$ 曲線にも S_{++} と S_{\pm} の対称性を識別する特徴が現れるはずであるが、その実験結果は、当初、 S_{\pm} 対称性の証拠とみなされた観があったが、物質の特徴を正確に考慮に入れた考察によって、むしろ軌道-格子結合がそ

の発現に役割を果たす S_{++} 波超伝導が実現している可能性が高いことを指摘した。

③ 超音波実験による格子系の挙動の解明

超音波測定から、縮重したふたつの3d軌道が持つ電気四極子(軌道)の揺らぎ(軌道揺らぎ)と結びつく弾性定数 C_{66} にだけに巨大ソフト化を観測した。この C_{66} のソフト化は、パルス強磁場(60T)中でも頑強に変化しない。これをもとに、非磁性の電気四極子揺らぎが超伝導発現に役割を果たしている可能性を指摘した。

§ 2. 研究実施内容

鉄系の超伝導オーダーパラメーター(Δ)の対称性同定を容易に進めることが出来る手段として、不純物効果の研究を当初から手がけた。そこでは $\text{LnFe}_{1-y}\text{M}_y\text{AsO}_{0.89}\text{F}_{0.11+x}$ (Ln=La, Nd; M=Co, Mn, Ru: いわゆるLn1111系)を主な対象にした(不純物 M がドーブされていない系において、 $x=0$ のときに T_c が最大となるよう試料を作成していることに注意)。得られた一連の結果が、これまでによく知られた磁氣的機構とは異なる新規な超伝導機構を示唆したので、さらに詳しい研究を続けることになった。その結果を表した代表的なものが図1である^{2, 8, 19, 23}。

オーダーパラメーター Δ が S_{\pm} 対称(Δ の符号が、逆格子空間内の Γ 点とM点の周りのフェルミ面上とで異なるもの)の場合には、その超伝導が非磁性不純物に対して極めて弱い。すなわち、伝導電子の不純物散乱によって T_c が急速に下降する(磁性不純物ではなおさらである)。これがよく知られた pair breaking 効果である。一方、 Δ の符号が同一の場合、低濃度域で非磁性不純物による散乱の影響は基本的に無い(Anderson theorem)。ここでは、伝導電子の不純物による散乱が pair breaking 効果をもたらしているかどうかについて調べた結果を、まず、以下に示す。

◆ Ln1111系にドーブされた不純物元素 M(=Co, Ni, Ru)はすべて局在磁気モーメントを持たない非磁性不純物で、元素1個あたり、それぞれ、1個、2個、0個の電子を系に供給することが、低温電子比熱係数 γ の測定を通して示された(いわゆる rigid band 描像が成立している)。◆このとき、Fe \rightarrow M(=Co, Ni)置換やO \rightarrow F置換によって生じる T_c の変化を、LaFeAsO の[Fe²⁺As⁻³]層にドーブされた電子の数 [M=Co, Ni では、それぞれ $y+0.11$, $2y+0.11$, O \rightarrow F では $x+0.11$]に対して

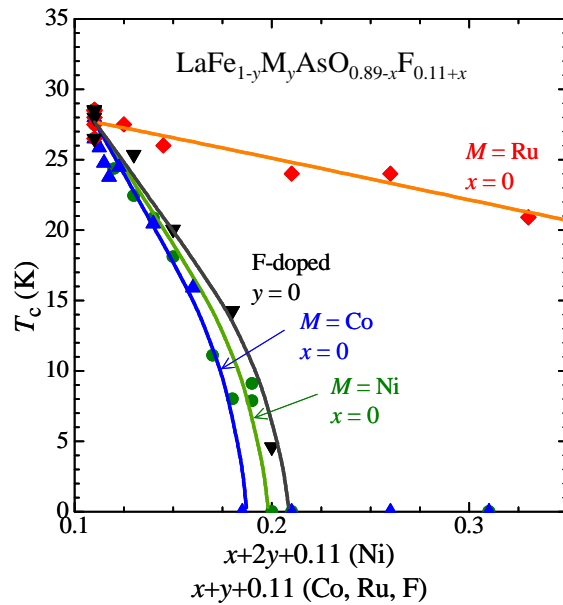


図 1 $\text{LaFe}_{1-y}\text{M}_y\text{AsO}_{0.89}\text{F}_{0.11+x}$ の T_c を母物質 LaFeAsO にドーブされた電子数に対して示した。ただし、 $M=\text{Ru}$ では電子数が変化しないがこれもあえて $y+0.11$ に対して示してみた。

示したのが図1である(図の $M=Ru$ については後述)。そこでは、 T_c が電子数だけでほぼ決定されていることがわかる。この電子数が ほぼ共通の値(臨界電子数)に達したとき T_c が消えているが、この値は、ドーパされた電子がホールのフェルミ面(Γ 点周りのもの)を埋め尽くすときの値にほぼ対応することから、超伝導の発現には、 Γ 点と M 点の周りの2種のフェルミ面の存在が重要なようである。◆ここで、pair breaking 効果が存在することを仮定し(これは、 S_{\pm} 対称性の場合を考えることに当たる)、残留抵抗等のデータから不純物による散乱の強さを決めたいと、 T_c の降下速度を見積もると、実験値とかけ離れて大きな値が得られる。例えば、 $M=Co$ では、 $y \leq 0.005$ で超伝導が消失することになってしまう。◆なお、 $M=Ru$ では isoelectronic な元素置換なので電子数が変化しないが、ここでは、 T_c を便宜的に $y+0.11$ に対してプロットした。このとき、 Ru ドープに対して T_c の変化が極めて小さいことも、第一義的に T_c を決定しているのが電子数であることを示している。すなわち、もし存在すれば T_c を大きく下降させるはずの pair breaking 効果が見えない。逆に、電子の伝導経路に散乱体が導入されない $Fe \rightarrow F$ 置換で他とほぼ同一の T_c 下降速度がみられてのは、これを支持している。

これまで、上記の結論を出すに当たって浮かび上がる疑問に対して、輸送特性等の幅広い実験結果をもとに、その正しさを注意深く検証してきた。例えば、「電子局在の効果」や系の「多バンド性」^{8, 19, 23}等、多様な視点からの理解であるが、ここでは詳述しない。

Γ 点と M 点周りのフェルミ面上で、超伝導オーダーパラメーター(Δ)が異なるか同一か(S_{\pm} 対称か S_{++} 対称か)によって振る舞いに差が出る物理量は、非磁性不純物効果以外にもいくつか存在する。そのうちで、比較的容易に信頼できるデータを取ることが出来るものとして、我々は、中性子非弾性散乱実験で観測される磁気励起スペクトル $\chi''(\mathbf{Q}, \omega)$ と、NMR の縦緩和率 $1/T_1$ を取り上げた。鉄系の超伝導が S_{\pm} の対称性を持っている場合には、 $\chi''(\mathbf{Q}, \omega)$ に鋭いピーク(resonance peak)が現れるが、 S_{++} 対称ではそれが現れない。さらに NMR では、 $1/T_1-T$ 曲線に S_{++} 対称の場合に T_c 直下で現れる coherence peak が S_{\pm} 対称の場合には現れない。これが、超伝導体の coherence factor を単純に考慮した議論の結果である。事実、実験で resonance peak に対応すると思われるものが見えたという多くの報告に加え、 $1/T_1-T$ 曲線に coherence peak が見えないことも判明し、一時、 S_{++} 対称性が広く信じられるようになったが、その場合、 T_c への非磁性不純物の結果はどうなるのか。これに答えることが、鉄系の超伝導が新規な発現機構を持つかどうかを見極めることに当たると考え、 $\chi''(\mathbf{Q}, \omega)$ と $1/T_1$ についても実験的に研究し、現実の物質に即した考察を行うことにした。

S_{\pm} 対称性に現れるとされる $\chi''(\mathbf{Q}, \omega)$ のピークの起源は、ほかにも存在することを、まず断わっておきたい。Onari ら(本チーム代表の佐藤を含む)によって指摘されたように、超伝導ギャップの形成によって、準粒子寿命が長くなる効果を考慮すれば、これは、 S_{++} 対称の超伝導体にも現れる¹⁰ ことがわかるが、そのピーク強度やピーク幅(鋭さ)は S_{\pm} 対称性を持つ場合に比べてそれほど顕著ではない。実験が、どちらを支持するかの情報を得るために、中性子散乱による $\chi''(\mathbf{Q}, \omega)$ の測定を行ったが、そこでは、 $LaFeAsO_{0.89}F_{0.11}$ の多結晶、 $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ の小さな結晶を多数並べたもの、 $Ca-Fe-Pt-As$ の単結晶 ($T_c \sim 30$ K, ~ 4.5 g)、さらにはもうひとつの $Ca-Fe-Pt-As$ 単結晶

($T_c \sim 32$ K, ~ 10.7 g)がそれぞれ実験に用いられた、これまでに論文発表を行ったものは、前者の3つの結果に対してである^{7, 18, 20, 22}。最後の結晶試料については、震災のために日本では実験を行えず、フランス Saclay 研究所に申請し、最近、ようやく実験データが得られた。現在はこれを解析中である。既発表のデータの概要をまとめると、 $\chi''(\mathbf{Q}, \omega)$ に現れるピーク強度や幅(もしくは鋭さ)、さらにはそれらの温度変化、加えてピークのエネルギーの 2Δ との相対位置までもが、Onari らの結果に favorable のように見える。ただ、これらは、バンド構造その他に影響を受けかねないので、最終結論にすることは控えている。なお、図2に Ca-Fe-Pt-As の単結晶($T_c \sim 30$ K, ~ 4.5 g)試料に対して得られた磁気励起スペクトル $\chi''(\mathbf{Q}, \omega)$ を例として示した(\mathbf{Q} は Fe の2次元正方格子をユニットセルにとったときの逆格子単位で(0.5, 0)の位置)。

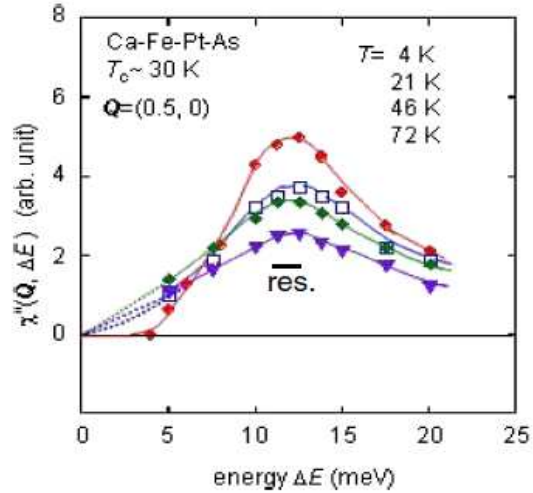


図2 Ca-Fe-Pt-As の磁気励起スペクトル $\chi''(\mathbf{Q}, \omega)$ をいくつかの温度で示し

さて、ここで NMR の coherence peak に言及する。LaRFeAsO_{1-x}F_x の NMR $1/T_1$ の温度依存性を、 T_c からそれ以下のかかなり広い温度域で $1/T_1 \propto T^n$ という関係式で表したとき、ベキ指数 n が optimal dope の試料($x \sim 0.11$)で最大値(~ 6)をとり、どちらに外れていっても減少することがわかった^{12, 26}。当初は、 $n \sim 3$ がこの系の特徴で、 S_{\pm} 対称性の証拠であるとする主張が多くなされていたが、詳しい考察から、 $n \sim 6$ が本質的で、その減少は optimal な試料から外れたときに現れる空間的不均一性に由来すると結論付けられた。

よく知られているように、Fe 系の超伝導体では、NMR- $1/T_1$ の温度依存性にいわゆるコヒーレンスピークが見られない。このことに関しても、 T_c での現実に大きな準粒子幅とその T_c 以下での温度依存性を考慮すれば S_{\pm} 対称性で再現することが出来る事を指摘してきた⁸⁾が、最近、磁性元素を含まない A15 型化合物にも、コヒーレンスピークが見られないものがあることを知った。コヒーレンスピークの非存在を S_{\pm} 対称性の証拠とする主張に論拠が無いことが、その実験事実からも明確になったものとする。

このように、磁気励起スペクトルや NMR の $1/T_1$ の結果をもとに当初なされた、 S_{\pm} 対称性を支持する議論は、根拠の薄弱なものであるように見えてきた。逆に、不純物効果の議論に呼応して進展した「軌道-格子結合」による“ S_{\pm} 対称の超伝導発現の主役”であるとする方向が出てきたといえる。それでは、その超伝導発現機構の現実性をさらに検証できるものとはなにか。軌道揺らぎとの結合を通して現れる格子系の特徴をあらわにすることが、まず考えられるので、そのために、超音波測定²¹⁾や中性子非弾性散乱によるフォノン測定に取り掛かることになった。

鉄系超伝導体には、構造相転移に加えて反強磁性転移が存在するが、これには、電気四極子

[軌道]の揺らぎが超伝導に重要な役割を果たしていると思われる。この電気四極子揺らぎの観測には、超音波計測によって弾性定数の低温ソフト化と吸収係数を観測することが重要である。本研究では、122系 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ を取り上げ、 $x=0.10, 0.07, 0.03, 0$ の4つの試料について超音波実験を行った。名大で育成された mm サイズの単結晶試料を用いた弾性定数の測定は、新潟大の装置を主として用い、さらには、ドレスデン強磁場研究センターのパルス強磁場装置を用いた。こうして、弾性定数 C_{66} の顕著なソフト化を観測し、その温度変化が $C_{66}=C_{66}^0(1-\Delta/(T-\Theta))$ で理解できることを示した。これは、 $x=0.10$ と $x=0.07$ の中間濃度に、構造相転移温度 T_S が零度になる量子臨界点が存在していることを示す。縮退した dyz , dxz バンドの電気四極子と超音波歪みとの結合が低温ソフト化をもたらし、超伝導に寄与する電子格子相互作用が著しく増強されていることを示す。この低温ソフト化が磁場に鈍感であることをも示した。ポイントは、縮重 dyz , dxz バンドの電気四極子(軌道)揺らぎを媒介に s_{\pm} 対称の超伝導が起きていることを、結果が示唆していることである。

一方、中性子非弾性散乱実験は、3月に起こった災害の影響で研究速度が鈍っていたが、去る11月28日から12月8日にフランス Saclay でのマシンタイムを得て実験が行われた(名大と代表者が現在所属している総合科学研究機構のグループ)。現在は、解析中なので、この時点での結果の発表は控えるが、今後に大きな期待を持たせてくれる。

最後に、軌道-格子結合を基本にした超伝導機構を発表した新潟大グループ研究^{14-16, 29)}について以下に述べる。そこでは、鉄の d 軌道と砒素の p 軌道を顕わに含み、第一原理計算結果をよく再現する2次元16バンド $d-p$ 模型が用いられた。実際には、 d 電子間クーロン相互作用および d 軌道と格子間の相互作用効果がRPA(乱雑位相近似)の範囲で扱われ、その電子状態と超伝導とが議論された。その結果、軌道内クーロン相互作用やフント則結合が大きい領域ではストライプ型反強磁性相の近傍でスピン揺らぎを媒介として s_{\pm} 波超伝導が実現するのに対して、軌道間クーロン相互作用や電子格子相互作用が大きい領域では軌道秩序相の近傍で軌道揺らぎを媒介として s_{++} 波超伝導が実現することがわかる。また、両者のクロスオーバー領域では、電子面上でギャップ関数にノードをもつ nodal s_{\pm} 波超伝が現れる^{14-16, 29)}。

超音波実験で、構造転移温度 T_S および超伝導転移温度 T_c まで続く巨大なソフト化が観測され、新規な超伝導メカニズムの可能性が高まってきたが、これが orthorhombic モードに対応する弾性定数 C_{66} のみに現れ、 B_{1g} , E_g モードに対応する弾性定数 $(C_{11}-C_{12})/2$ や C_{44} には見られないことが、チーム内の超音波実験で明らかにされたが、²¹⁾この実験結果を再現するため、 $d_{yz}-d_{zx}$ の軌道揺らぎと orthorhombic モードとの電子格子相互作用 g を取り入れたモデルを提案し、Hartree-Fock 近似とRPAの範囲内で電子状態と超伝導を議論した¹⁵⁾。その結果、 g が大きい場合には、 $d_{yz}-d_{zx}$ の軌道間の占有数が分裂する強軌道秩序が tetra-ortho 構造転移を伴って実現し、その転移温度 T_S が反強磁性転移温度 T_N より高くなること、また、この場合に実現する超伝導は強軌道揺らぎを媒介とする s_{\pm} 波であることが示された。一方、 g が小さい場合には、ストライプ型反強磁性が構造転移を伴って実現し、その転移温度はドーピングに依らず $T_S=T_N$ となること、また、この場合に実現する超伝導は多くの研究者によって主張されてきたスピン揺らぎを媒介とする s_{\pm} 波であることが示された。前者は、鉄系超伝導体の実験の相図(ドーピングされたときは常に $T_S>T_N$)と弾性

定数 C_{66} のソフト化を再現するとともに、得られた s_{++} 波超伝導が、超伝導転移温度 T_c が非磁性不純物の影響をほとんど受けないという名大グループの実験結果とコンシステントであることが示された。さらに、orthorhombic モードとの電子格子相互作用 g が大きいことは、 C_{66} の温度依存性から導出された 50K もの巨大な Jahn-Teller エネルギーともコンシステントなものである。

RPA では考慮されていない軌道揺らぎのモード間結合効果を SCR 理論により解析し、超音波実験による弾性定数 C_{66} の温度依存性を広い温度領域で良く再現する結果を得た²⁹⁾。さらに、パーテックス補正をシステムティックに考慮できる SCF (自己無撞着揺らぎ) 理論を適用することにより、軌道揺らぎの相関効果に加えて、軌道揺らぎと磁気揺らぎの間にも強い相関効果があることを明らかにした。また、Hartree-Fock 近似や RPA では考慮されていない動的局所相関効果を DMFT (動的平均場理論) を用いて調べ、バンド計算に比べてバンド幅が $1/2$ から $1/3$ に繰り込まれる ARPES の実験結果を再現すると共に、電子相関と軌道-格子結合の協力効果により、ストライプ型反強磁性に対して強軌道秩序がより安定化されることを示した。これにより、現実的な相互作用パラメータによって鉄系超伝導体の実験の相図 ($T_S > T_N$) が再現されることが明らかとなっている。

以上、ごく粗っぽく研究の概要を記述してきた。ここで触れなかったことにも、その主研究方向を決定付けたものや傍証を与えたもの、さらには、独立した研究としても興味深いものなど、数多くの研究成果があるが、そのことについては割愛する。

ここでは単に、新規な超伝導機構の存在可能性の指摘から始まり、その検証のための蓄積をひとつひとつ進めてきたことを強調しておきたい。今後は、軌道揺らぎとの結合を通して格子系に現れる特徴的挙動を知り、鉄系が(新規)超伝導発現機構を持つことを明らかに出来れば大変うれしい。これらの研究を通して、数多い遷移金属化合物に広い研究領域が拓けることを願うとともに、この研究が、相関を持つ電子系や格子系、軌道揺らぎ、さらにはそれと格子との結合までを取り込んだ統一的な物理概念形成に発展することを願っている。

§ 3. 研究実施体制

(1) 「佐藤正俊」グループ(研究機関別)

① 研究者名

	氏名	所属	役職	参加時期
○	佐藤正俊	名古屋大学	教授 (名誉教授)	H20.10~H22.3 (H24.4~H24.3)
	小林義明	名古屋大学	准教授	H20.10~H24.3
	安井幸夫	名古屋大学	助教	H20.10~H24.3
*	三浦陽子	名古屋大学	JST-RA	H21.4~H22.3
	川股隆行	名古屋大学	特任助教	H22.4~H23.3
	伊藤正行	名古屋大学	教授	H22.4~H24.3
	寺崎一郎	名古屋大学	教授	H22.4~H23.3

② 研究項目

- (i) 超伝導をもたらしている電子状態と常伝導物性の理解、
- (ii) 超伝導の対称性と発現機構の同定
- (iii) 高い転移温度(T_c)を持つ系の探索、物質・材料開拓の新たな方向の見極め

(2) 「大野義章」グループ(研究機関別)

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	大野 義章	新潟大学	教授	H22.10~H24.3
	柳瀬 陽一	新潟大学	准教授	H22.10~H24.3
	椎名 亮輔	新潟大学	准教授	H22.10~H24.3
	後藤 輝孝	新潟大学	教授	H22.10~H24.3
	根本 祐一	新潟大学	准教授	H22.10~H24.3
	石川 文洋	新潟大学	助教	H22.10~H24.3

② 研究項目

- (i) 超伝導の発現機構と対称性に関する理論研究
- (ii) 超音波による鉄ヒ素系超伝導体の弾性定数の低温ソフト化とその磁場依存性の研究

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

- ① 発表総数(発行済:国内(和文) 0件、国際(欧文) 23件):
- ② 未発行論文数(“accepted”、“in press”等)(国内(和文) 0件、国際(欧文) 6件)
- ② 論文詳細情報
 1. On the Superconductivity of $\text{LaFe}_{1-y}\text{Co}_y\text{AsO}_{1-x}\text{F}_x$
Ayaka Kawabata, Sang Chul Lee, Taketo Moyoshi, Yoshiaki Kobayashi and Masatoshi Sato
J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) No. 10 103704 (1-4).
 2. Preparation of the oxypnictides and studies on their superconductivity
Ayaka Kawabata, Sang Chul Lee, Taketo Moyoshi, Yoshiaki Kobayashi, and Masatoshi Sato
J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) supplement C 147-148.
 3. Distinct transport behaviors of $\text{LaFe}_{1-y}\text{Co}_y\text{AsO}_{1-x}\text{F}_x$ ($x=0.11$) between the superconducting and nonsuperconducting metallic y regions divided by $y \sim 0.05$
S. C. Lee, A. Kawabata, T. Moyoshi, Y. Kobayashi and M. Sato
J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No.4 043703 (1-4). doi: 10.1143/JPSJ.78.043703
 4. Distinct Physical Behaviors of $\text{LaFe}_{1-y}\text{Co}_y\text{AsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ between the Superconducting and Nonsuperconducting Metallic Regions of y Divided by $y \sim 0.05$
M. Sato, Y. Kobayashi, S. C. Lee, H. Takahashi,¹ and T. Moyoshi:
Physica C doi:10.1016/j.physc.2009.10.040

5. Studies on Superconducting $\text{LaFe}_{1-y}\text{Co}_y\text{AsO}_{1-x}\text{F}_x$ –For the Understanding of the Superconducting Symmetry of Fe-Pnictides-
Y. Kobayashi, A. Kawabata, S. C. Lee, T. Moyoshi, and M. Sato
Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No. 7 073704 (1-4). doi:10.1143/JPSJ.78.073704
6. NMR Studies on the Superconducting Symmetry of Iron Pnictide Systems
Y. Kobayashi, S. C. Lee, H. Takahashi, T. Moyoshi, and M. Sato:
Physica C doi:10.1016/j.physc.2009.11.135
7. Magnetic Excitations of Superconducting $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$
T. Moyoshi, S. C. Lee, S. Tatematsu, Y. Yasui, Y. Kobayashi, M. Sato and K. Kakurai:
Physica C doi:10.1016/j.physc.2009.11.085
8. Studies on Effects of Impurity-Doping and NMR Measurements of La_{1111} and/or Nd_{1111} Fe-Pnictide Superconductors
Masatoshi Sato, Yoshiaki Kobayashi, San Chul Lee, Hidefumi Takahashi, Erika Satomi, and Yoko Miura
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) No. 1 014710-(1-10). doi:10.1143/JPSJ.79.014710
9. Effects of Ru Doping on the Transport Behaviors and Superconducting Transition Temperature of $\text{NdFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$
Sang Chul Lee, Erika Satomi, Yoshiaki Kobayashi, and Masatoshi Sato
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) No. 2 023702-(1-4). doi: 10.1143/JPSJ.79.023702
10. Neutron Scattering Peak Structure in both s_{++} and s_{\pm} wave states in Iron-pnictide Superconductor
S. Onari, H. Kontani, and M. Sato:
Phys. Rev. B **81** (2010) 060504(R). doi: 10.1143/PhysRevB.81.060504
11. Superconducting Transition Temperatures and Transport Properties of $\text{LaFe}_{1-y}\text{Ru}_y\text{AsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ and $\text{LaFeAsO}_{0.89-x}\text{F}_{0.11+x}$
Erika SATOMI, Sang Chul LEE, Yoshiaki KOBAYASHI, and Masatoshi SATO
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) No. 9 094702 (1-6), DOI: 10.1143/JPSJ.79.094702.
12. ^{75}As -NMR Studies of $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ for various x values
Yoshiaki Kobayashi, Erika Satomi, Sang Chul Lee, and Masatoshi Sato
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 093709 (1-4). DOI: 10.1143/JPSJ.79.093709.
13. Magnetic ordering in V-Layers of the Superconducting System of $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_3$
Shunichi Tatematsu, Erika Satomi, Yoshiaki Kobayashi, and Masatoshi Sato
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) No. 12 123712 (1-4), DOI: 10.1143/JPSJ.79.123712.
14. Cooperative effects of Coulomb and electron-phonon interactions in the two-dimensional 16-band d-p model for iron-based superconductors
Y. Yanagi, Y. Yamakawa, N. Adachi, and Y. Ōno
Phys. Rev. B **82** (2010) 064518 (1-10), DOI: 10.1103/PhysRevB.82.064518.
15. Orbital Order, Structural Transition, and Superconductivity in Iron Pnictides
Y. Yanagi, Y. Yamakawa, N. Adachi, and Y. Ōno:
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 123707 (1-4), DOI: 10.1143/JPSJ.79.1237074.
16. Phase diagram of the two-dimensional 16-band d-p model for iron-based superconductors
Y. Yanagi, Y. Yamakawa, and Y. Ōno
Physica C **470** (2010) S349–350, DOI: 10.1016/j.physc.2009.10.109
17. Crystal Structure of New Pt-Doped Fe Pnictide Superconductors

- Takayuki KAWAMATA, Takehumi IIDA, Shunsuke SUZUKI, Erika ATOMI, Yoshiaki KOBAYASHI, Masayuki ITOH, and Masatoshi SATO: *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) No. 7, 073710 (3 pages). DOI: 10.1143/JPSJ.80.073710
18. Neutron Scattering Study of Magnetic excitation Spectra of $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$
Shunichi TATEMATSU, Yukio YASUI, Taketo MOYOSHI, Kiyochiro MOTOYA,
Kazuhisa KAKURAI and Masatoshi SATO: *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) No. 7, 073703 (4
pages). DOI: 10.1143/JPSJ.80.073703
 - 19.. Study of Ni-doping Effect of Specific Heat and Transport Properties for
 $\text{LaFe}_{1-y}\text{Ni}_y\text{AsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$
Takayuki Kawamata, Erika Satomi, Yoshiaki Kobayashi, Masayuki Itoh and Masatoshi Sato:
J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) No. 8, 084720 (5 pages). DOI: 10.1143/JPSJ.80.084720
 20. Magnetic Excitation Spectra of Superconducting Ca-Fe-Pt-As System
Masatoshi SATO, Takayuki KAWAMATA, Yoshiaki KOBAYASHI, Yukio Yasui, Takefumi
IIDA, Shunsuke SUZUKI, Masayuki ITOH, Ryoichi KAJIMOTO, Kenji NAKAMURA,
Yasuhiro INAMURA, and Masatoshi ARAI: *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) No. 9, 093709 (4
pages). DOI: 10.1143/JPSJ.80.093709
 21. Quadrupole Effects of Layered Iron Pnictide Superconductor $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$
Terutaka Goto, Ryosuke Kurihara, Koji Araki, Keisuke Mitsumoto, Mitsuhiro Akatsu, Yuichi
Nemoto, Shunichi Tatematsu, and Masatoshi Sato: *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) No. 7,
073702 (4 pages). (Editor's choice) DOI: 10.1143/JPSJ.80.073702
 22. On the Magnetic Excitation Spectra of $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$ in the Superconducting State
M. Sato, S. Tatematsu, Y. Yasui, Y. Kobayashi, T. Moyoshi, K. Motoya, and K. Kakurai:
J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) SB002 (Proc. of Int. Workshop on Neutron Application
on Strongly Correlated Electron Systems).
 23. On the superconducting pairing mechanism of Fe-based systems -Is it new or
well-known? -
M Sato, and Y Kobayashi: *Solid State Commun. Special Issue on Iron pnictides* DOI:
10.1016/j.ssc.2011.12.022

未発表のもの

24. Impurity effects on the superconducting transition temperatures of Fe pnictides and
superconducting symmetry of the order parameter
M. Sato, Y. Kobayashi, S. Satomi, T Kawamata, and M. Itoh: Proc. LT26, Beijing, Aug.
11-17, 2011. *J. Phys.: Conf. Ser.* to be published.
25. Study of magnetic excitation spectra of several Fe-pnictide systems
M Sato, T Kawamata, Y Kobayashi, Y Yasui T Iida, K Suzuki, M Itoh, T Moyoshi, K
Motoya, R Kajimoto, M Nakamura, Y Inamura and M Arai: Proc. LT26, Beijing, Aug. 11-17,
2011. *J. Phys.: Conf. Ser.* to be published.
26. NMR Studies on Iron Pnictide Superconductors of $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ and
Ca-Fe-Pt-As
Y. Kobayashi, T. Iida, K. Siuzuki, E. satomi, T. Kawamata, M. Itoh and M. Sato: Proc. LT26,
Beijing, Aug. 11-17, 2011. *J. Phys.: Conf. Ser.* to be published.
27. X-ray Diffraction Study of Spontaneous Strain in Fe-Pnictide Superconductor,

NdFeAsO_{0.89}F_{0.11}

28. H. Fujishita, Y. Kobayashi, and M. Sato, H. Unno, H. Kaneko, H. Okamoto, M. Ohashi, Y. Kobayashi, and M. Sato.: Eur. Phys. J. B to be published.
29. Structural transition, ferro-orbital order and its fluctuation-mediated s₊₊-wave superconductivity in iron pnictides
Y. Ōno, Y. Yanagi, N. Adachi and Y. Yamakawa:
Solid State Commun.

(4-2) 特許出願

TRIP 研究期間累積件数(国内 0 件、海外 0 件)

§ 5. 結び

(5-1) 研究成果の意義、今後の展開

ごく粗っぽく研究の概要を記述した。ここで触れなかったことにも、その研究の主な方向を決定付けたものや傍証を与えたもの、さらには、独立した研究としても興味深いものなど、数多くの研究成果があるが、それを割愛することを残念に思う。

ここでは単に、新規な超伝導機構の存在可能性の初の指摘から始まり、その検証のための蓄積をひとつひとつ進めてきたことのみを強調したい。今後は、軌道揺らぎとの結合を通して格子系に現れる特徴的挙動を知り、鉄系が(新規)超伝導発現機構を持つことを明らかに出来れば大変うれしい。もしそうなれば、その物質群が無数に広がる遷移金属化合物系の超伝導研究に新しい地平が広がる。このような研究は、超伝導研究分野のみに留まらず、相関を持つ電子系と格子系、電子系軌道の揺らぎ、また、その揺らぎと格子の結合までを取り込んだ統一的な固体論の形成にまで発展するのではないかと、昨今の計算法の進展を見て大きな期待を抱いている。