

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料  
〔研究進捗評価用〕

平成20年度採択分

平成23年5月12日現在

研究課題名（和文） **多元環境下の新しい量子物質相に関する研究**

研究課題名（英文） **New Quantum Phases of Matter  
in Multidimensional Environments**

研究代表者

**北岡 良雄** (KITAOKA YOSHIO)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授



研究の概要：革新的な実験技術を結集して、多元的な電子構造や多様な格子構造をもつ新物質の創製、および多彩な物理環境下で発現する新しい量子物質相の発見と現象の解明、これまでは独立の物理現象としてとらえられていた磁性、超伝導、強誘電性の協奏効果および競合効果によって出現する「多元環境下での新しい量子物質相」の発見と現象の解明を目的とする。「物質科学のフロンティア」をさらに押し広げつつ、共通する物理概念の深化を通じて、これまでに発見されている強相関系超伝導物質の超伝導転移温度をさらに超える「新規な超伝導物質」の創製に向けた研究展開も目指す。

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：強相関電子系物質、高温超伝導、磁気秩序、強誘電性、核磁気共鳴

#### 1. 研究開始当初の背景

(1) 電子間に働く引力によって起こる「超伝導」と反発力によって起こる「磁性」という物理学の二つの重要な現象は、長い間、相反するものと考えられてきた。ところが、両者がお互いに深い関連をもっていることが分かってきた。1986年に電子スピンの反対向きに揃っている反強磁性絶縁体である銅酸化物に電気伝導を生じさせるキャリアをわずかにドーピングすることによって室温に迫るような高温で超伝導が発見されたことが契機となり、超伝導現象は物質を横断する学際的な物質科学の研究フロンティアとなっている。

(2) 強相関電子系では、従来では相容れることのないと考えられてきた複数の電子物性の新しい協奏現象が生み出される。磁性と相反する電子物性として長年考えられてきた「強誘電性」が、螺旋（らせん）磁気秩序を有する磁性体において出現することが、ここ数年の研究で明らかになっている。

#### 2. 研究の目的

これまでに固体物理の研究では、従来は独立の物理現象としてとらえられていた磁性、超伝導、強誘電性の協奏効果および競合効果によって出現する「多元環境下での新しい量子物質相」を発見し、それらの現象を解明することを目的とする。

#### 3. 研究の方法

多元的な電子構造や多様な格子構造をも

つ新物質を創製し、多重極限の物理環境下での革新的な実験手法；(1)精密NMR測定技術、(2)レーザー超高分解能光電子分光技術、(3)SPring-8の高輝度放射光を用いたX線回折実験技術、および独創的な試料創製技術；(4)量子物質創製技術、(5)多層系高温超伝導物質創製技術、(6)異なるトポロジーを有する新銅酸化物高温超伝導体創製技術、および(7)物性現象の理論解析力を結集して、研究を推進している。

#### 4. これまでの成果

(1) 銅酸化物高温超伝導現象の解明  
銅酸化物高温超伝導が発見後25年を経てなお完全なる理解に至っていない一つの要因は、単層La-Cu-O系の磁気超伝導相図が理論的に説明できないことにある。単層La-Cu-O系ではキャリアドーピングによるCuO<sub>2</sub>面の乱れの影響が避けられない問題として残っていた。銅酸素面(CuO<sub>2</sub>面)が3枚以上の多層型結晶構造では、CuO<sub>2</sub>面が極めて理想的な平坦性を有し、特に内側のCuO<sub>2</sub>面には、わずかなキャリアがドーピングされている状態になることに着目し、理想的なCuO<sub>2</sub>面を有する多層型銅酸化物高温超伝導体の系統的な研究を進めてきた。その結果、Hg系の5層型では10%程度のキャリア濃度まで反強磁性金属が安定し、超伝導ともマイクロに共存するという、従来の高温超伝導の相図とは全く異なる結果を得た。そこで、2層から5層に至るn層型銅酸化物へ当研究を展開した。

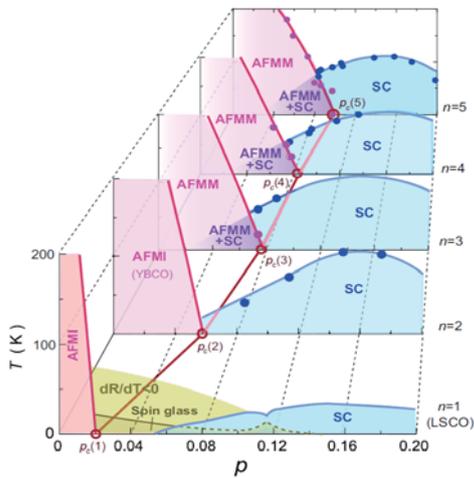


図 1：多層系高温超伝導物質の反強磁性と超伝導の  $\text{CuO}_2$  層数依存性

その結果、反強磁性秩序と超伝導相の共存相は低ドーピングの  $\text{CuO}_2$  面に普遍的な性質であること、 $\text{CuO}_2$  層数の増大と共に、共存領域が拡大すること、枚数 (n) が減るに従い、反強磁性臨界点は低ドーピング側へ移ることが明らかとなった (図 1)。この一連の研究を通じて明らかになった理想的な  $\text{CuO}_2$  面の基底状態のホール濃度相図は、ドーピングされたモット絶縁体を記述する理論 (t-J) モデルによって定量的にも説明でき、高温超伝導の起源は「反強磁性秩序を生み出すものと同一のもの」、つまり反強磁性秩序を生み出す超交換相互作用 (J) に起因することを明らかにした。本研究成果は、発見以来 25 年経過してもなお混沌としていた高温超伝導現象の解明に導くものである。

#### (2) 室温での弱磁場による電気磁気効果の実現

これまで報告されている多くのマルチフェロイクス材料においては、室温よりはるかに低い温度でしか電気磁気効果が観測されていない。さらに、これらの材料における電気磁気効果発現のためには、数万ガウスという非常に強い磁場を必要とする。これらの理由のため、これまで電気磁気効果を応用した実用的な各種デバイス、メモリ等を構成することが困難であった。本研究によって、「Z型六方晶フェライト」と呼ばれるストロンチウム、コバルト、鉄及び酸素からなる酸化物セラミックス (化学式  $\text{Sr}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ) が、図 2 に示すように室温領域かつ数百ガウスという弱い磁場の印加で顕著な電気磁気効果を示すことが明らかとなった。本成果によって、室温において弱磁場で動作する電気磁気効果が実現され、同効果を利用したメモリ素子などの電子デバイスへの応用に向けた研究・開発が加速することが期待される。

(3) Fe 系超伝導物質の転移温度は、FeAs 四面体局所構造が正四面体のときに、最大  $T_c$

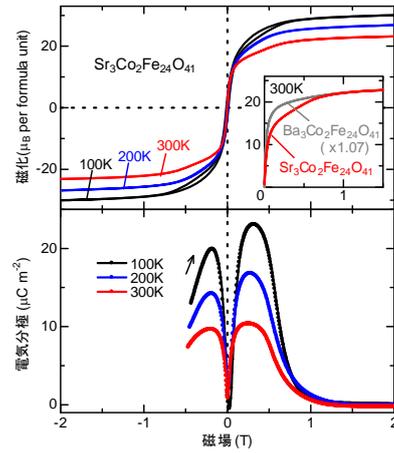


図 2：磁化と電気分極の磁場依存性

となること、および逆同位体効果の発見は、この系の超伝導発現が単純な電子-格子相互作用に起因するものではないことを示唆しており、超伝導発現機構の解明に重要な寄与すると期待される。

#### 5. 今後の計画

新たに、レーザー超高分解能光電子分光グループ、および SPring-8 の高輝度放射光を用いた X 線回折実験グループを加えて、(1) 反強磁性相と高温超伝導相の共存状態での両秩序相の相互結合状態、(2) モット絶縁体近傍の超低ドーピング領域での反強磁性相と超伝導相図、(3) 低ドーピング領域での反強磁性と超伝導の共存状態での電子構造などに焦点を当て、電子構造、および構造物性等の多彩な観点から、研究を深化させることを計画している。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

発表論文等：(他全 188 編)

1. Y. Kitaoka et al., Novel superconducting phases in copper oxides and iron-oxypnictides: NMR studies, *J. Phys. Chem. Solids*, **72**, 486-491 (2011).
2. High- $T_c$  Superconductivity with  $T_c = 52\text{K}$  under Antiferromagnetic Order in Five-Layered Cuprate  $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$  with  $T_N = 175\text{K}$ :  $^{19}\text{F}$ - and  $\text{Cu}$ -NMR Studies, S. SHIMIZU, H. MUKUDA, Y. KITAOKA, A. IYO et al, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **80**, 043706/1-4 (2011). (Editor's choice).
3. T. Kimura et al., Low-field magneto electric effect at room temperature, *Nature Materials*, **9**, 797-802 (2010).

受賞など：(他全 6 件)

1. 日本 IBM 科学賞 (2010 年)、受賞課題：「らせん磁性に伴うマルチフェロイクス効果の先駆的研究」受賞者：木村剛
2. 日本学術振興会賞 (2011 年)、受賞課題：「電気磁気効果に関連する物質および現象の研究」受賞者：木村剛