

科学研究費補助金（学術創成研究費）公表用資料 〔事後評価用〕

平成16年度採択分

平成21年 3月31日現在

研究課題名（和文） 電子機能物質における自己組織化の解明と応用

研究課題名（英文） Research on Self-organization for Advanced Materials with Novel Electronic Functions

研究代表者

加藤 礼三 (KATO REIZO)

独立行政法人理化学研究所・加藤分子物性研究室・主任研究員



研究の概要：従来、分子性固体、遷移金属酸化物、ナノ炭素材料（フラーレン、カーボンナノチューブ、グラフェン等）等の分野で個別的に展開されてきた「電子機能物質」研究を「自己組織化」の概念によって総合化・融合化し、高度な機能と新奇物性の分野横断的探索をとおして物質の分類にとらわれない革新的・学際的な電子機能研究を行った。

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・機能物質化学

キーワード：強相関電子系、フラストレーション、超分子、超伝導、光電子分光

1. 研究開始当初の背景

電子機能開拓のフロンティアは、お互いに強い相互作用をおよぼし合っている電子の集合体が示す複雑で多様な物性へと急速に転換している。このような電子系では、電子の「自己組織化」が起こり、他の電子相との競合・共存が高度な機能と新奇物性をもたらす。さらに、「自己組織化」電子の物性発現の舞台である原子・分子配列の制御においても、自己組織化の概念が重要な役割を果たす。これらは有機物、無機物といった化学的分類によらない普遍的な現象であり統一的なアプローチが可能である、という認識に基づいて電子物性開拓を開始した。

2. 研究の目的

日本が国際的な優位性を確保する、1) 分子性導体、2) 遷移金属酸化物、3) ナノ炭素材料、4) 光電子分光、5) 物性理論の分野の研究者が結集し、従来の枠組みにとらわれない異分野融合的な物質科学研究を強力に推進する。

3. 研究の方法

「機能・物性開拓」担当と「電子状態解析」担当とから構成される研究組織のもとで、以下の項目を遂行する。

- 1) 「自己組織化」分子の設計と制御による電子機能開拓、
- 2) 遷移金属酸化物における「自己組織化」電子の直接観察と電子機能開拓、
- 3) ナノ炭素材料・有機薄片結晶を用いた伝

導機能開発、4) 光電子分光による「自己組織化」電子の観察、5) 電子の「自己組織化」の理論的解析。特に、低次元空間に閉じ込められたり、三角格子のようにフラストレーション効果で自己組織化が阻害される幾何学的条件下に置かれた時、電子が強い相関効果や量子効果と相まって示す複雑で多様な振る舞いに注目する。



4. 研究の主な成果

(1) スピン液体の発見

フラストレーションを有する磁性体における基底状態は、物性物理学の未解決の問題として長い間研究され続けている。特に、P. W. Andersonによって提案されたスピン液体状態が存在するか否かが重要な焦点となっていたが、分子性固体と遷移金属酸化物とから、次元性の異なる2つのスピン液体を発見し、この問題解決に大きな進展をもたらした。

(2) 2次元VB (一重項スピン対) 固体と超伝導の発見

一連の、2次元三角格子構造をもつ $S=1/2$ スピン系分子性導体 $\text{Pd}(\text{dmit})_2$ 塩の探索の結果、 $\text{EtMe}_3\text{P}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ のモット絶縁相において、一重項スピン対 (VB) が格子上に自己組織化して VB 固体を形成することによってフラストレーションを解消する現象を発見した。さらに、この状態に圧力を加えると超伝導を示すことを明らかにした。高温超伝導体を含め、反強磁性絶縁相に隣接する従来の強相関係超伝導体に対し、VB 固体相に隣接する超伝導体は、世界で初めての例であり、超伝導メカニズムの観点からも、その学術的インパクトは極めて大きい。

(3) ゼロギャップ伝導体結晶と光誘起巨大電流応答の発見

2次元層状構造をもつ分子性導体 $\alpha\text{-ET}_2\text{I}_3$ は、135 K で電子が自己組織化する電荷秩序状態へ転移する。この電荷秩序を圧力によって抑えると、グラフェンと同様に、運動量空間で伝導帯と価電子帯とが点で接しているゼロギャップ伝導体になることを実験的に証明した。結晶の状態でゼロギャップ伝導体となる物質は、これが最初である。また、電荷秩序状態にレーザーパルス光を照射すると、自己組織化した電子が融解して7桁以上の抵抗変化を伴う巨大電流応答をもつ新たな金属状態が出現し、電場を印加している限り永続的に保持される現象を有機物質では世界で初めて観測した。その学術的、産業的インパクトは極めて大きい。

(4) 超分子ナノワイヤーの開発に成功

伝導性の有機分子と絶縁性有機分子とが自己組織的に集合して結晶化するという性質を活用して、結晶性2芯ナノワイヤー、および被覆の絶縁性を向上させたナノワイヤーの開発に成功した。これは、ワイヤー間の短絡を防ぎ、またワイヤーの規則配列を可能にするものであり、3次元分子記憶媒体の配線等への道を開いた。

(5) 最高の電界効果移動度を持つ有機モットFETの開発に成功

強相関電子系に属する分子性導体の単結晶薄膜を、アルコール中でシリコン基板に載せて引き上げるという手法で、電界効果トランジスタ (FET) を作製し、これまで知られていた有機モットFETの電界効果移動度の最高値 $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ をはるかにしのぐ、 $94 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を記録した。この値は、一般的なシリコンFETの10分の1程度の値にまで迫ったことになり、学術的、産業的インパクトは極めて大きい。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究で見出された多くの新物質は、物質科学における日本の優位性をさらに確固たるものにした。また、世界最高性能の、超高分解能光電子分光および時間分解光電子分光を建設し、多様な物質系に対して測定を行った。特に、これまで不可能であった分子性固体の角度分解光電子分光に世界で初めて成功した。今後、生体関連分子の電子状態研究等の未踏領域への発展も含め、その学術的インパクトは極めて大きい。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

(1) Y. Kawasugi, H. M. Yamamoto, M. Hosoda, N. Tajima, T. Fukunaga, K. Tsukagoshi, and **R. Kato**, "Strain-induced superconductor/insulator transition and field effect in a thin single crystal of molecular conductor", *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 243508/1-3 (2008).

(2) T. Hikihara, L. Kecke, T. Momoi, and A. Furusaki, "Vector chiral and multipolar orders in the spin-1/2 frustrated ferromagnetic chain in magnetic field", *Phys. Rev. B* **78**, 144404/1-19 (2008).

(3) N. Tajima, S. Sugawara, M. Tamura, **R. Kato**, Y. Nishio and K. Kajita, "Transport properties of massless Dirac fermions in an organic conductor $\alpha\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_3$ under pressure", *Europhys. Lett.*, **80**, 47002/1-5 (2007).

(4) Y. Shimizu, H. Akimoto, H. Tsujii, A. Tajima, and **R. Kato**, "Mott Transition in a Valence-Bond Solid Insulator with a Triangular Lattice", *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 256403/1-4 (2007).

(5) T. Kiss, T. Yokoya, A. Chainani, S. Shin, T. Hanaguri, M. Nohara, H. Takagi, "Charge-order-maximized momentum-dependent superconductivity", *Nature Physics*, **3**, 720-725, (2007).

(6) Y. Okamoto, M. Nohara, H. Aruga Katori, and H. Takagi, "Spin-liquid state in the $S=1/2$ hyperkagome antiferromagnet $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ ", *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 137207/1-4 (2007).

(7) N. Tajima, J-I. Fujisawa, N. Naka, T. Ishihara, **R. Kato**, Y. Nishio, and K. Kajita, "Photo-induced Insulator-Metal Transition in an Organic Conductor $\alpha\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_3$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **74**, 511-514 (2005).

(8) T. Ito, A. Chainani, T. Haruna, K. Kanai, T. Yokoya, S. Shin, and **R. Kato**, "Temperature-Dependent Luttinger Surfaces", *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 246402/1-4 (2005).

ホームページ

[http://www.riken.jp/lab-www/molecule/so
usei/index.html](http://www.riken.jp/lab-www/molecule/sousei/index.html)