

[www.cems.riken.jp](http://www.cems.riken.jp)

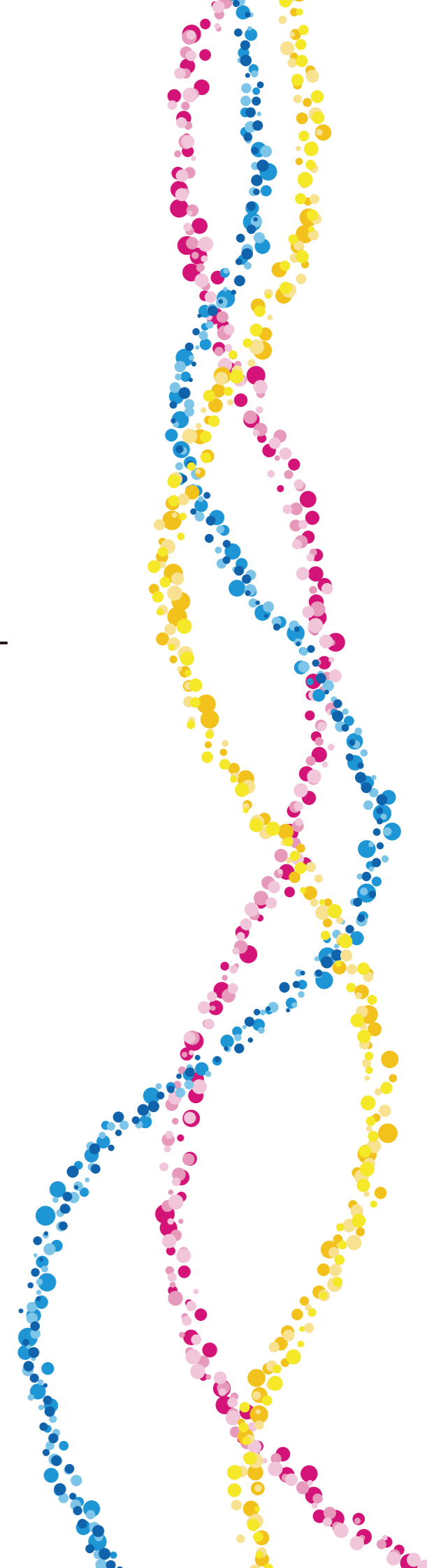
**CEMS** Center for Emergent Matter Science  
創発物性科学研究センター



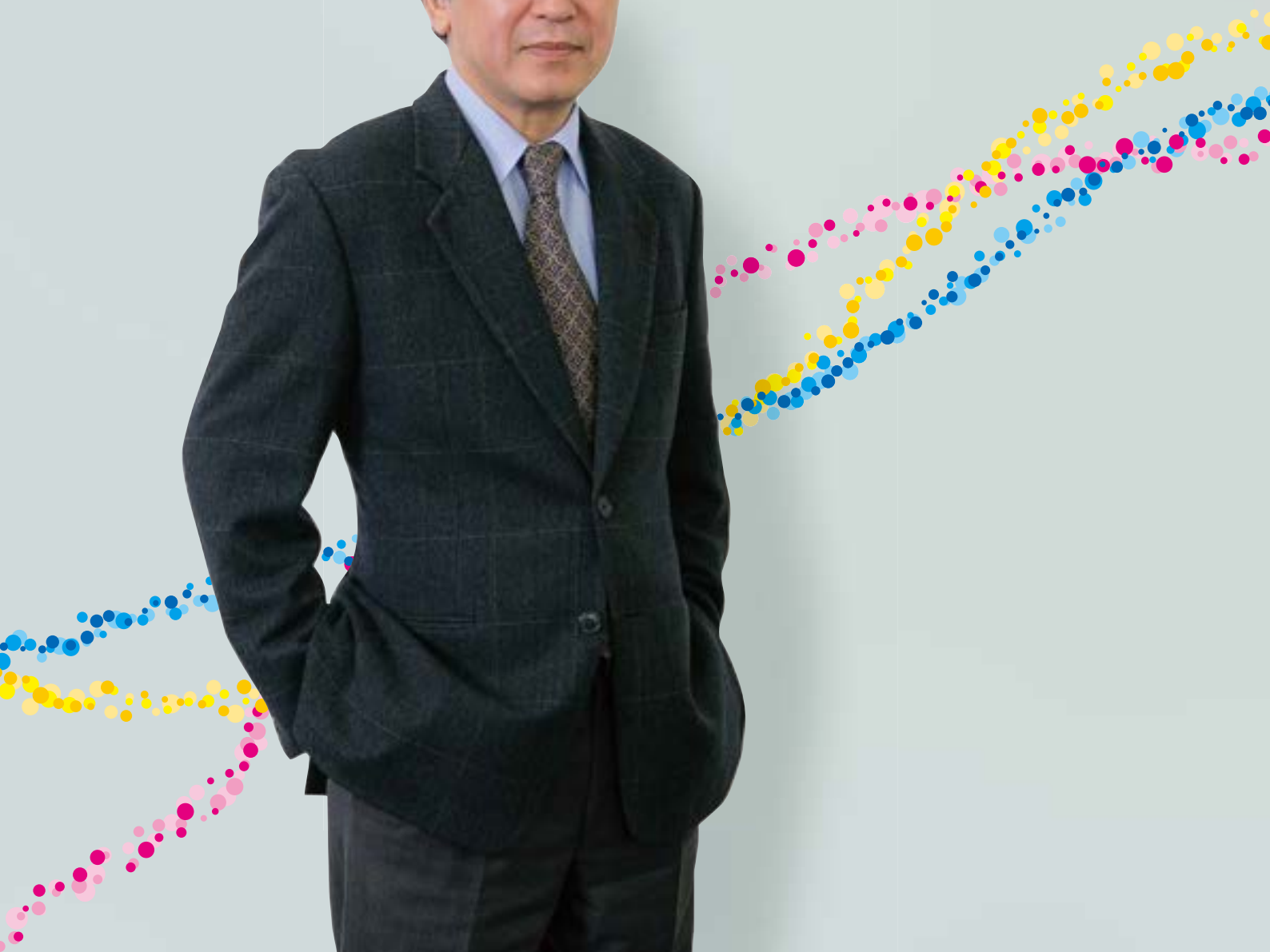
2022



国立研究開発法人理化学研究所 創発物性科学研究センター  
〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1  
Email: [cems@riken.jp](mailto:cems@riken.jp)



# 環境調和型の





# 持続可能な社会の実現

## Message センター長ご挨拶

理化学研究所に、物理-化学-エレクトロニクスの基礎を統合し、研究のトップリーダーと次代を担う若手研究者を糾合した、創発物性科学研究センター (CEMS) が発足し10年目を迎えました。

創発物性科学では、物質中に含まれる電子やスピンや分子の動きを制御することで、創発物性・機能の発現とそれを可能ならしめる物質系やデバイスの創製を目指します。ここで「創発性」とは、多数の構成要素からなる集合体が、個々の要素の性質の総和としては記述できないような、質的に新しい性質が出現することを言います。強く絡み合う多数の電子が示す驚くべき物性機能を探る「強相関物理」、分子系が形成する超構造を設計し画期的な機能発現の場を提供する「超分子機能化学」、そして量子力学の支配する絡み合いを状態変数として利用する「量子情報エレクトロニクス」、がCEMSを形作る3つの基幹分野です。しかし同時に、CEMSは研究組

織の創発性をも利用します。個々の力や専門性を糾合、集中することによって初めて達成可能な、すなわち総力戦を必要とする、挑戦的な課題の解決を果たすことが、理研の戦略センターのミッションと考えます。

CEMSが解決すべき挑戦的課題、実現すべき創発機能として挙げるのは、「第3のエネルギー革命」を先導する固体や分子内の電子が示すエネルギー機能です。電気エネルギーという極めて利用しやすいエネルギー形態とその移送システムのインフラストラクチャーを人類が手にしたのは、高々この120年の間です。蒸気機関による力学エネルギーを電磁誘導によって電気エネルギーに転換するにあたって、燃焼エネルギーあるいは核エネルギーを用いたのが、それぞれ第1、第2のエネルギー革命であったとすれば、今は、力学エネルギーを介することなく、固体・分子内の電子の働きを利用する創発電磁気学の建

設、すなわち「第3のエネルギー革命」が始まっています。半導体エレクトロニクス、太陽光発電、高温超伝導に続く、固体・分子内電子に基づく新しいイノベーションを希求した研究が、現在も加速しながら続いています。私たちのセンターの目的は、従来技術・原理の改良や延長ではなく、物性科学基礎研究からのアプローチによってのみ可能な、性能指数に大きな不連続的飛躍をもたらす新原理・新物質の発見です。またそこに至る道筋を、人類全体の英知を蓄積する学理として、いかに発信できるかによって、私たち自身の研究の価値を定めたいと思います。

創発物性科学研究センター センター長

十倉 好紀

## 創発物性科学研究センター RIKEN Center for Emergent Matter Science

物理・化学・エレクトロニクスの3分野のトップ研究者が集まり、創発現象の学理を明らかにするとともにその応用への道を拓きます。

創発物性科学研究センターは、「強相関物理」「超分子機能化学」「量子情報エレクトロニクス」の3つの領域からなります。世界トップの研究者が国内外から集結し、約40の研究グループ・研究チーム、約200人の研究者を擁する、世界有数の物性科学の研究拠点です。

それぞれの分野を専門に研究するセンターは世界にいくつもありますが、この3分野を集結したセンターは他にはありません。環境調和型の持続可能な社会の実現には、物理・化学・エレクトロニクスの3分野の協力が不可欠です。この3つの分野が集まることで、研究にも「創発現象」が起きて、予測もしなかった画期的な成果が生まれると確信しています。

創発物性科学研究センターが目指すのは、すぐに実用化が見込めるような技術の開発ではありません。既存の技術の延長ではなく、50年、100年先においても人類社会に貢献できる革新的な技術原理を追求します。そのためには、基礎研究にも力を注ぎ、新しい学理を構築することが不可欠です。

3つの分野の最先端を切り拓いてきた研究者と、従来の学理にとらわれず新しい発想を持った若い研究者が集まり、総掛かりで真にチャレンジングな研究に挑む。それが創発物性科学研究センターです。

### 創発物性科学とは

多数の要素が集まったときに、個々の要素からは予測できなかった性質が現れることを、「創発性」といいます。例えば、膨大な数の電子が強く相互作用すると、1個の電子からは予測できないほど強力な電氣的・磁氣的な作用を生み出します。また、多数の分子を組み合わせることで、個々の分子にはなかった新しい機能を持つ物質を作ることができます。

このように電子や分子などが集合すると、個々の構成要素の単なる集合としては予測不可能な驚くべき物性や機能が現れます。創発現象の原理を明らかにし、新しい物性や機能を生み出そうという新しい学問領域を「創発物性科学」と呼びます。

例えば、金属や化合物を冷却していくとある温度以下で電気抵抗がゼロになる超伝導は、電子間の相互作用によって現れる創発現象の一つです。通常の超伝導は極低温で現れますが、それが、室温程度で起こる物質を設計・開発できれば、電力を損失なく送電することが可能になるでしょう。このように、創発物性科学は、私たちの生活に大革命をもたらし、環境調和型の持続可能な社会の実現に大きく貢献します。



## ■ 強相関物理領域

強相関物性研究グループ (十倉 好紀) .....	6
強相関理論研究グループ (永長 直人) .....	7
強相関界面研究グループ (川崎 雅司) .....	8
強相関物質研究グループ (田口 康二郎) .....	9
強相関量子伝導研究チーム (十倉 好紀) .....	10
強相関量子構造研究チーム (有馬 孝尚) .....	11
創発物性計測研究チーム (花栗 哲郎) .....	12
量子物性理論研究チーム (古崎 昭) .....	13
計算量子物性研究チーム (柚木 清司) .....	14
計算物質科学研究チーム (有田 亮太郎) .....	15
電子状態スペクトロスコピー研究チーム (石坂 香子) .....	16
強相関スピン研究チーム (古川 はづき) .....	17
電子状態マイクロスコピー研究チーム (Xiuzhen Yu) .....	18
創発光物性研究チーム (小川 直毅) .....	19

## ■ 超分子機能化学領域

創発ソフトマター機能研究グループ (相田 卓三) .....	20
創発分子機能研究チーム (瀧宮 和男) .....	21
創発生体関連ソフトマター研究チーム (石田 康博) .....	22
創発デバイス研究チーム (岩佐 義宏) .....	23
創発ソフトシステム研究チーム (染谷 隆夫) .....	24
創発機能高分子研究チーム (但馬 敬介) .....	25
創発生体工学材料研究チーム (伊藤 嘉浩) .....	26
創発超分子材料研究チーム (夫 勇進) .....	27
ソフトマター物性研究チーム (荒岡 史人) .....	28
物質評価支援チーム (橋爪 大輔) .....	29

## ■ 量子情報エレクトロニクス領域

量子機能システム研究グループ (樽茶 清悟) .....	30
量子凝縮体研究チーム (上田 正仁) .....	31
創発現象観測技術研究チーム (進藤 大輔) .....	32
量子ナノ磁性研究チーム (大谷 義近) .....	33
量子システム理論研究チーム (Daniel Loss) .....	34
スピン物性理論研究チーム (多々良 源) .....	35
創発物性科学研究支援チーム (秋元 彦太) .....	36
量子効果デバイス研究チーム (石橋 幸治) .....	37
量子電子デバイス研究チーム (山本 倫久) .....	38

## ■ 統合物性科学研究プログラム

動的創発物性研究ユニット (賀川 史敬) .....	39
情報変換ソフトマター研究ユニット (宮島 大吾) .....	40
創発分子集積研究ユニット (佐藤 弘志) .....	41
計算物質機能研究ユニット (Yong Xu) .....	42
低次元輸送現象研究ユニット (Ding Zhang) .....	43
トポロジカル量子現象研究ユニット (梁 田) .....	44
創発分光学研究ユニット (高橋 陽太郎) .....	45
創発機能界面研究ユニット (中野 匡規) .....	46
トポロジカル量子物質研究ユニット (Max Hirschberger) .....	47
トポロジカル材料設計研究ユニット (平山 元昭) .....	48

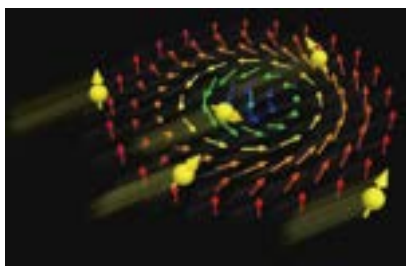
# 強相関物性研究グループ

Strong Correlation Physics Research Group



## 巨大な固体電磁機能を創発する トポロジカルなスピントクスチャー

磁性体中に広く見出される、スキルミオンと呼ばれるスピントクスチャー。スキルミオンとは、もともと、核物理学において、核子の状態を記述するために、スキルム博士によって提唱された概念で、量子論における「粒子」をトポロジーによって定義する考え方である。このようなトポロジカルな「粒子」が、身の回りにある磁性体の中に普遍的に存在する可能性を見出した。図中の矢印はスピン（電子の磁気モーメント）の向きを表す。粒子の周辺では、垂直方向を向くが、中に入るに従い、スピンは渦を巻き、中心部では逆を向く。このスピンのトポロジーは通常の磁気構造から連続的には変形できないので、トポロジーで保護された安定な粒子、スキルミオン、としてふるまう。スキルミオンは、電子系（矢印のスピンをもつ黄色球）に働く巨大な仮想磁場（創発磁場）を引き起こし、電流を横に曲げる（ホール効果）と同時に、自身も電流で駆動される。その臨界電流密度は  $100 \text{ A/cm}^2$  と極端に小さく、通常の磁壁の電流駆動に比べて、10万分の1以下の電流で済む。このスキルミオンを新しい情報担体とするエレクトロニクス—スキルミオニクス—に向けた取り組みが進行中である。



スキルミオンと運動する電子

### 主要論文

1. A. Kitaori, N. Kanazawa, T. Yokouchi, F. Kagawa, N. Nagaosa, and Y. Tokura, "Emergent electromagnetic induction beyond room temperature", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2105422118 (2021).
2. Y. Fujishiro, N. Kanazawa, R. Kurihara, H. Ishizuka, T. Hori, F. S. Yasin, X.Z. Yu, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, N. Nagaosa, M. Tokunaga, and Y. Tokura, "Giant anomalous Hall effect from spin-chirality scattering in a chiral magnet", *Nat. Commun.*, 12, 317 (2021).
3. T. Yokouchi, F. Kagawa, M. Hirschberger, Y. Otani, N. Nagaosa, and Y. Tokura, "Emergent electromagnetic induction in a helical-spin magnet", *Nature*, 586, 232 (2020).
4. T. Kurumaji, T. Nakajima, M. Hirschberger, A. Kikkawa, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, Y. Taguchi, T. Arima, Y. Tokura, "Skyrmion lattice with a giant topological Hall effect in a frustrated triangular-lattice magnet", *Science*, 365, 914 (2019).
5. Y. Fujishiro, N. Kanazawa, T. Nakajima, X. Z. Yu, K. Ohishi, Y. Kawamura, K. Kakurai, T. Arima, H. Mitamura, A. Miyake, K. Akiba, M. Tokunaga, A. Matsuo, K. Kindo, T. Koretsune, R. Arita, and Y. Tokura, "Topological transitions among skyrmion- and hedgehog-lattice states in cubic chiral magnets", *Nat. Commun.*, 10, 1059 (2019).

十倉 好紀 工学博士・グループディレクター  
tokura@riken.jp

### 研究分野

物理学／工学／材料科学

### キーワード

強相関電子系、トポロジカル絶縁体、  
スピン軌道相互作用、ベリー位相物理、  
マルチフェロイクス、スキルミオン

### 略 歴

- 1981 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了
- 1986 東京大学理学部物理学科 助教授
- 1994 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授
- 1995 同 工学系研究科物理工学専攻 教授
- 2001 産業技術総合研究所 強相関電子技術研究センター センター長
- 2007 理化学研究所 交差相関物性科学研究グループ グループディレクター
- 2008 産業技術総合研究所 フェロー（現職）
- 2010 理化学研究所 物質機能創成研究領域 領域長
- 2010 同 強相関量子科学研究グループ グループディレクター
- 2013 同 創発物性科学研究センター センター長（現職）
- 2013 同 強相関物理部門 強相関物性研究グループ グループディレクター（現職）
- 2014 同 強相関物理部門 強相関量子伝導研究チーム チームリーダー（現職）
- 2017 東京大学卓越教授（現職）
- 2019 東京大学特別栄誉教授

### グループ紹介・概要



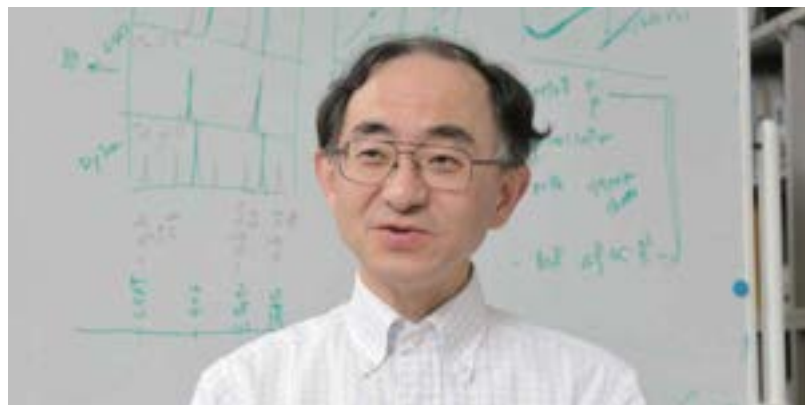
強相関電子系が示す、驚くべき創発物性を開拓し、その機能発現の学理を構築することを目指す。特に、自明でないスピン構造や軌道構造における、電子の輸送特性、誘電的特性、光学的特性に注目し、そのスピン・軌道状態との相関を明らかにする。また、相対論的なスピン軌道相互作用の強い系にも着目し、その電子物性に与える影響と新しい磁気電気機能を明らかにする。具体的に研究対象とする物質群は、高温超伝導、超巨大磁気抵抗系、マルチフェロイクス、トポロジカル絶縁体、スキルミオン系を含む。

### 主要メンバー

（特別研究員）ZHANG Chenglong  
（基礎特研）藤代 有絵子, 村山 陽奈子  
（上級技師）金子 良夫, 寺倉 千恵子

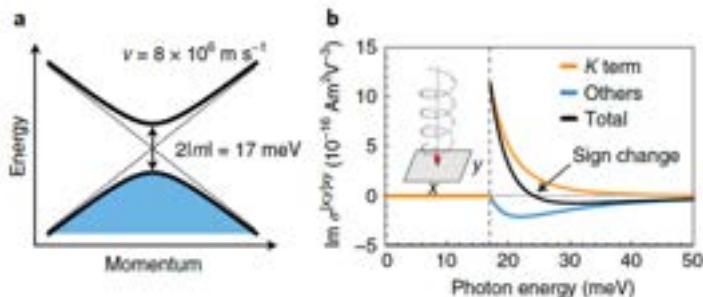
# 強相関理論研究グループ

Strong Correlation Theory Research Group



## 光学応答における量子幾何学

光学応答は物質の性質の中でも基本的であるばかりではなく、応用の観点からも重要である。この光学応答と、波動関数の持つ幾何学的な性質が深く関係していることが認識され始めていたが、その全貌は明らかではなかった。我々は、線形応答、2次の非線形応答、3次の非線形応答がそれぞれ非ユークリッド・リーマン幾何学における、メトリック、接続、曲率のそれぞれに対応することを見出し、一般性を持つ理論的枠組みを構築することに成功した。そして、その具体的な応用として、磁性トポロジカル絶縁体の表面状態における3次の非線形光学応答である光誘起ホール効果を計算し、そのバンド端においてはリーマン曲率で表現される項が支配的になることを示した。



(左図) 磁性トポロジカル絶縁体のバンド構造。(右図) 円偏光に対する光電流の光子エネルギー依存性。K term は波動関数の幾何学的な量であるリーマン曲率と直接関係した部分であり、ギャップの直上で支配的な寄与をする。

J. Ahn, G.Y. Guo, N.Nagaosa, A. Vishwanath, "Riemannian geometry of resonant optical responses", *Nature Physics* 18, 290 (2022).

### 主要論文

1. J. Ahn, G.Y. Guo, N.Nagaosa, A. Vishwanath, "Riemannian geometry of resonant optical responses", *Nat. Phys.* 18, 290 (2022).
2. H. Ishizuka and N.Nagaosa, "Theory of bulk photovoltaic effect in Anderson insulator", *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 118(10) e2023642118 (2021).
3. N. Nagaosa, "Emergent inductor by spiral magnets", *JJAP* 58, 12909 (2019).
4. R. Wakatsuki, Y. Saito, S. Hoshino, Y. M. Itahashi, T. Ideue, M. Ezawa, Y. Iwasa, and N. Nagaosa, "Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric superconductors", *Sci. Adv.*, 3, e1602390 (2017).
5. T. Morimoto, and N. Nagaosa, "Topological nature of nonlinear optical effects in solids", *Sci. Adv.*, 2, e1501524 (2016).

永長 直人 理学博士・グループディレクター  
nagaosa@riken.jp

### 研究分野

物理学／工学／材料科学

### キーワード

創発電磁気学、電気磁気効果、シフトカレント、非相反効果、スピンホール効果、界面電子、超伝導

### 略歴

- 1983 東京大学物性研究所 助手
- 1986 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士学位取得
- 1998 同 教授 (現職)
- 2001 産業技術総合研究所 強相関電子技術研究センター 強相関理論チーム チーム長
- 2007 理化学研究所 交差相関理論研究チーム チームリーダー
- 2010 同 強相関理論研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 副センター長 (現職)
- 2013 同 強相関物理部門 部門長 (現職)
- 2013 同 強相関物理部門 強相関理論研究グループ グループディレクター (現職)

### グループ紹介・概要



固体における電子状態を、そのトポロジカルな性質に着目して理論的に研究し、非散逸性カレントを含む新奇電子機能の開拓を行う。第一原理電子状態計算と、場の理論を用いた解析的手法、数値計算によるモデル解析を組み合わせることで、強相関電子の示す磁気特性、光学特性、伝導特性、熱特性、などをその内部自由度(スピンや軌道)に着目して予言・設計する。特にこれらの諸物性の間の非自明な相関—交差相関—に焦点を当て、相対論的スピン軌道相互作用やスピネクスチャーがもたらすトポロジーを考慮することで、電子分裂、非散逸性などの新しい概念の構築を目指す。

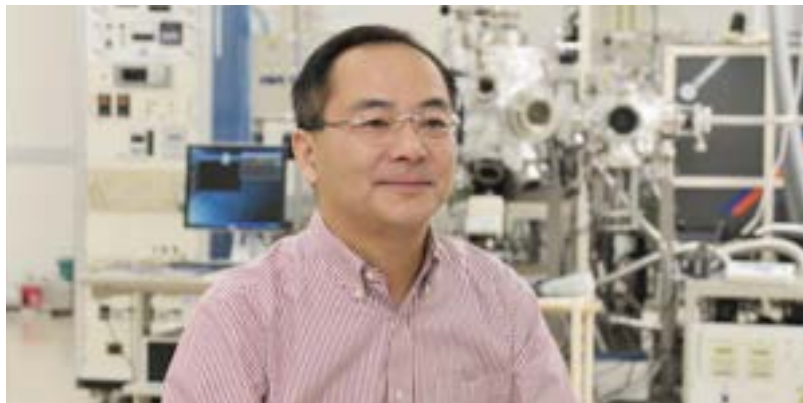
### 主要メンバー

(上級研究員)

MISHCHENKO Andrey, 小椎八重 航  
(基礎特研) ZHANG Xiao-Xiao, LIU Yizhou

# 強相関界面研究グループ

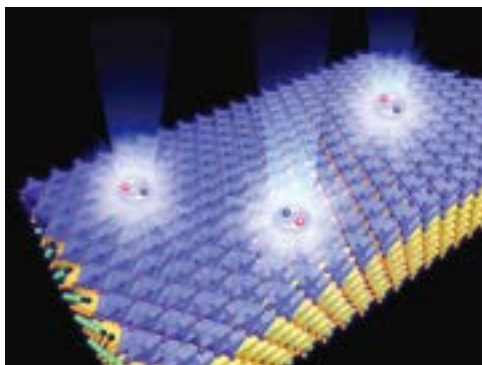
Strong Correlation Interface Research Group



## 分子線エピタキシー法で作製した 高品質ヨウ化物薄膜における励起子特性の解明

ヨウ化物半導体は、強い光吸収や高い励起子安定性を持ち、太陽電池や発光素子などの光機能性材料として注目されている。近年は多彩な磁気構造や量子伝導も報告され、新しい量子物質としての可能性も広がっている。しかし、これまでヨウ化物の単結晶薄膜に関する研究は皆無であった。当研究室では、分子線エピタキシー法によるヨウ化物の高品質薄膜成長法を確立し、ヘテロ接合界面で発現する新規量子物性や機能性を開拓を目指している。

その一環として、代表的なワイドギャップ半導体であるヨウ化銅 (CuI) の薄膜成長を行い、格子整合する InAs 基板上に高品質な単結晶薄膜の作製に成功した。作製した薄膜は、非常に高い格子コヒーレンスを持ち、その表面は原子レベルで平坦である。また、低温において非常にシャープな自由励起子発光の観測にも成功した。このような明瞭な励起子発光は CuI のバルク単結晶試料でも観測された例がなく、作製した薄膜が極めて欠陥密度の低い高い結晶性を有することを示している。これは、ヨウ化物薄膜を基軸とする新しい物性研究分野の創出につながる画期的な結果である。



エピタキシャル成長したヨウ化銅薄膜からの自由励起子発光の概念図

### 主要論文

1. T. Yasunami, M. Nakamura, S. Inagaki, S. Toyoda, N. Ogawa, Y. Tokura, and M. Kawasaki "Molecular beam epitaxy of two-dimensional semiconductor  $\text{BiI}_2$  films exhibiting sharp exciton absorption", *Appl. Phys. Lett.*, 119, 243101 (2021).
2. M. Uchida, S. Sato, H. Ishizuka, R. Kurihara, T. Nakajima, Y. Nakazawa, M. Ohno, M. Kriener, A. Miyake, K. Ohishi, T. Morikawa, M. S. Bahramy, T. Arima, M. Tokunaga, N. Nagaosa, and M. Kawasaki "Above-ordering-temperature large anomalous Hall effect in a triangular-lattice magnetic semiconductor", *Sci. Adv.*, 7, eabl5381 (2021).
3. D. Maryenko, M. Kawamura, A. Ernst, V.K. Dugaev, E. Ya. Sherman, M. Kriener, M. S. Bahramy, Y. Kozuka, and M. Kawasaki "Interplay of spin-orbit coupling and Coulomb interaction in ZnO-based electron system", *Nat. Commun.*, 12, 3180 (2021).
4. S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, M. Kriener, Y. Taguchi, and M. Kawasaki "Intrinsic coupling between spatially-separated surface Fermi-arcs in Weyl orbit quantum Hall states", *Nat. Commun.*, 12, 2572 (2021).
5. S. Inagaki, M. Nakamura, Y. Okamura, M. Ogino, Y. Takahashi, L. C. Peng, X. Z. Yu, Y. Tokura, and M. Kawasaki "Heteroepitaxial growth of wide bandgap cuprous iodide films exhibiting clear free-exciton emission", *Appl. Phys. Lett.*, 118, 012103 (2021).

川崎 雅司 工学博士・グループディレクター  
m.kawasaki@riken.jp

### 研究分野

物理学／工学／化学／材料科学

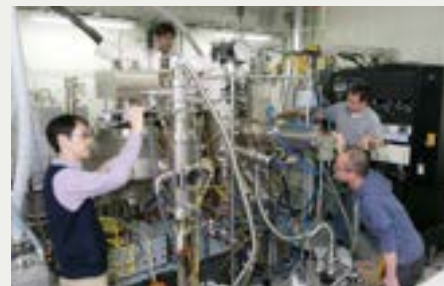
### キーワード

トポジカルエレクトロニクス、薄膜・界面、トポジカル物質、非自明光電効果、非自明ホール効果

### 略 歴

- 1989 東京大学大学院工学系研究科化学エネルギー工学専攻 博士課程修了
- 1989 日本学術振興会特別研究員
- 1989 米国 IBM ワトソン研究所 博士研究員
- 1991 東京工業大学 助手
- 1997 東京工業大学 助教授
- 2001 東北大学金属材料研究所 教授
- 2007 理化学研究所 交差相関超構造研究チーム チームリーダー
- 2010 同 強相関界面デバイスチーム チームリーダー
- 2011 東京大学大学院工学系研究科量子相エレクトロニクス研究センター 教授 (現職)
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長 (現職)
- 2013 同 強相関物理部門 強相関界面研究グループ グループディレクター (現職)

### グループ紹介・概要



当グループでは、運動量空間と実空間の双方において電子構造に幾何学的(トポジカル)な特異性を持つトポジカル物質の薄膜や界面を研究対象としている。これらの固体中では、従来の古典力学の理解の範疇を超えた非自明な効果が電子の運動に創発する。実空間の磁気渦や運動量空間の磁気単極子は巨大なホール効果に、光励起された分極結晶ではソフト電流による効率的な光電効果が生じる。これらの電子流は非散逸性が高いと期待でき、この電子流に情報やエネルギーを乗せて運ぶ新規デバイスを設計して実証し、トポジカルエレクトロニクスという新たな分野を切り拓く。

### 主要メンバー

(上級研究員)

高橋 圭, 中村 優男, MARYENKO Denis



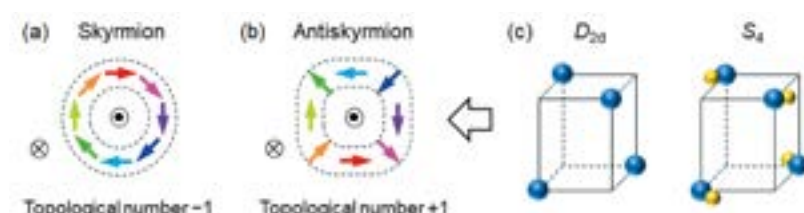
# 強相関物質研究グループ

Strong Correlation Materials Research Group



## 室温でアンチスキルミオンを示す新物質の発見

スキルミオンは、整数のトポロジカル数で定義されるナノメートルサイズの磁気渦であり、安定な粒子として振舞うことから、高性能の磁気メモリとしての応用が期待されている。一方、アンチスキルミオンは、スキルミオンと逆符号のトポロジカル数を持つ磁気渦であり、新しいトポロジカル磁気構造として近年注目されている。しかしながら、これまでに報告されているアンチスキルミオン物質は  $D_{2d}$  対称性を持つホイスラー合金のみであり、アンチスキルミオンのトポロジカル物性の解明と応用の実現に向けて、新物質開拓が求められていた。当グループでは、 $S_4$  対称性を持つシュライバーサイト ( $\text{Fe, Ni}$ )<sub>3</sub>P に Pd を加えた  $\text{Fe}_{1.9}\text{Ni}_{0.9}\text{Pd}_{0.2}\text{P}$  を合成し、室温を含む広い温度範囲でアンチスキルミオンが発現することを発見した。また、磁場や試料の厚さを変えることでアンチスキルミオンとスキルミオンが相互変換できることや、厚い試料の表面付近で  $S_4$  対称性を反映したノコギリ型の新奇な磁気ドメイン構造が発現することを見出した。



(a) スキルミオン、(b) アンチスキルミオン、および  
(c) アンチスキルミオン物質の結晶構造の対称性を模式的に示した。

### 主要論文

1. K. Karube, L. C. Peng, J. Masell, M. Hemmida, H.-A. Krug von Nidda, I. Kézsmárki, X. Z. Yu, Y. Tokura, and Y. Taguchi, "Doping control of magnetic anisotropy for stable antiskyrmion formation in schreibersite ( $\text{Fe, Ni}$ )<sub>3</sub>P with  $S_4$  symmetry", *Adv. Mater.*, 34, 2108770 (2022).
2. K. Karube, L. C. Peng, J. Masell, X. Z. Yu, F. Kagawa, Y. Tokura, and Y. Taguchi, "Room-temperature antiskyrmions and sawtooth surface textures in a non-centrosymmetric magnet with  $S_4$  symmetry", *Nat. Mater.*, 20, 335 (2021).
3. M. Kriener, M. Sakano, M. Kamitani, M. S. Bahramy, R. Yukawa, K. Horiba, H. Kumigashira, K. Ishizaka, Y. Tokura, and Y. Taguchi, "Evolution of Electronic States and Emergence of Superconductivity in the Polar Semiconductor GeTe by Doping Valence-Skipping Indium", *Phys. Rev. Lett.*, 124, 047002 (2020).
4. A. Doi, S. Shimano, D. Inoue, T. Kikitsu, T. Hirai, D. Hashizume, Y. Tokura, and Y. Taguchi, "Band engineering, carrier density control, and enhanced thermoelectric performance in multi-doped SnTe", *APL Mater.*, 7, 091107 (2019).
5. V. Kocsis, T. Nakajima, M. Matsuda, A. Kikkawa, Y. Kaneko, J. Takashima, K. Kakurai, T. Arima, F. Kagawa, Y. Tokunaga, Y. Tokura, and Y. Taguchi, "Magnetization-polarization cross-control near room temperature in hexaferrite single crystals", *Nat. Commun.*, 10, 1247 (2019).

田口 康二郎 博士(工学)・グループディレクター  
y-taguchi@riken.jp

### 研究分野

物理学／工学／材料科学

### キーワード

強相関電子系、スキルミオン、マルチフェロイクス、熱電効果、超伝導

### 略歴

- 1993 ソニー株式会社 総合研究所 研究員
- 1997 東京大学大学院工学系研究科 助手
- 2002 同 博士学位取得
- 2002 東北大学金属材料研究所 助教授
- 2007 理化学研究所 交差相関物質研究チーム チームリーダー
- 2010 同 強相関物質研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 強相関物理部門 強相関物質研究チーム チームリーダー
- 2018 同 創発物性科学研究センター 強相関物理領域 強相関物質研究グループ グループディレクター (現職)
- 2018 同 創発物性科学研究センター センター長室長 (現職)

### チーム紹介・概要



当グループでは、遷移金属酸化物をはじめとする強相関電子系のバルク試料において、巨大な交差相関応答の発現やその機構の解明、および新しい物質機能の創製を目的としている。そのために、超高压合成をはじめとする種々の合成法を用いて試料を合成し、新物質・新機能探索を行っている。具体的には、(1) 新規スキルミオン物質の開発、(2) マルチフェロイクス物質における電気磁気交差応答の巨大化・高温化、(3) 新規磁性半導体の開拓、(4) 新規熱電材料の開発、(5) 新規超伝導体の開発などである。これらの強相関材料における巨大応答を利用して、持続可能社会の構築に資する新機能性材料の創製を目指す。

### 主要メンバー

(上級研究員)  
KRIENER Markus Wilhelm Bernhard  
(研究員) 中村 大輔, 軽部 皓介, KHANH Nguyen  
(技師) 吉川 明子

# 強相関量子伝導研究チーム

Strong Correlation Quantum Transport Research Team



## 薄膜超構造を用いた 二次元ディラック電子の表面量子伝導

トポジカル絶縁体とは、物質内部は三次元的なバンドギャップを有する絶縁体であるが、表面にディラック状態と呼ばれる二次元的なギャップの開かない金属的バンドを有する物質である。ディラック電子は有効質量を持たず、電子スピンは結晶運動量の向きに垂直に偏極していることから、電荷・スピン自由度の両者に関する量子伝導の舞台となり、低消費電力デバイスなどへの応用が期待されている。特に、表面ディラック電子が磁性体と相互作用した結果生じる量子異常ホール効果は、非散逸な一次元伝導を外部から磁場をかけることなく実現するため、近年盛んに研究されている。当チームは分子線エピタキシー (MBE) 法を用いることで、トポジカル絶縁体の一つである  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  を強磁性絶縁体  $(\text{Zn,Cr})\text{Te}$  によって上下から挟み込んだ薄膜超構造を作製した。希釈冷凍機を用いて極低温に冷却することで、量子異常ホール効果を明瞭に観測することに成功した。今後は、薄膜超構造を駆使することでトポジカル物質に機能性を付与することを目的とし、特に、量子コンピューターへの応用が期待されているマヨラナ粒子の観測・制御を超伝導体との超構造界面で行う。



トポジカル絶縁体表面における量子ホール効果のイメージ

### 主要論文

1. M. Mogi, Y. Okamura, M. Kawamura, R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, T. Morimoto, N. Nagaosa, M. Kawasaki, Y. Takahashi, and Y. Tokura, "Experimental signature of the parity anomaly in a semi-magnetic topological insulator", *Nat. Phys.*, 18, 390 (2022).
2. K. Yasuda, T. Morimoto, R. Yoshimi, M. Mogi, A. Tsukazaki, M. Kawamura, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, N. Nagaosa and Y. Tokura, "Large non-reciprocal charge transport mediated by quantum anomalous Hall edge states", *Nat. Nanotechnol.*, 15, 831 (2020).
3. K. Yasuda, H. Yasuda, T. Liang, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, N. Nagaosa, M. Kawasaki, and Y. Tokura, "Nonreciprocal charge transport at topological insulator/superconductor interface", *Nat. Commun.*, 10, 2734 (2019).
4. R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, "Current-driven magnetization switching in ferromagnetic bulk Rashba semiconductor  $(\text{Ge, Mn})\text{Te}$ ", *Sci. Adv.*, 4, eaat9989 (2018).
5. K. Yasuda, M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, F. Kagawa, and Y. Tokura, "Quantized chiral edge conduction on domain walls of a magnetic topological insulator", *Science*, 358, 1311 (2017).

十倉 好紀 工学博士・チームリーダー

tokura@riken.jp

### 研究分野

物理学／工学／材料科学

### キーワード

強相関電子系、高温超伝導体、スピン軌道相互作用、トポジカル絶縁体、界面電子構造

### 略歴

- 1981 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程修了
- 1986 東京大学理学部物理学科 助教授
- 1994 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授
- 1995 同 工学系研究科物理工学専攻 教授
- 2001 産業技術総合研究所 強相関電子技術研究センター センター長
- 2007 理化学研究所 交差相関物性科学研究グループ グループディレクター
- 2008 産業技術総合研究所 フェロー (現職)
- 2010 理化学研究所 物質機能創成研究領域 領域長
- 2010 同 強相関量子科学研究グループ グループディレクター
- 2013 同 創発物性科学研究センター センター長 (現職)
- 2013 同 強相関物理部門 強相関物性研究グループ グループディレクター (現職)
- 2014 同 強相関物理部門 強相関量子伝導研究チーム チームリーダー (現職)
- 2017 東京大学卓越教授 (現職)
- 2019 東京大学特別栄誉教授

### チーム紹介・概要



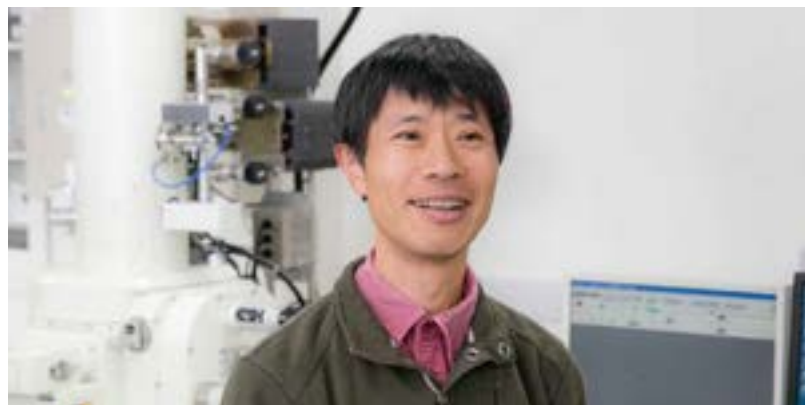
当チームでは、電子間相互作用の強い系およびスピン軌道相互作用の強い系に着目し、バルクおよび薄膜ヘテロ界面等で生じる様々な量子輸送現象に関して研究を行っている。具体的には、トポジカル絶縁体薄膜表面・界面におけるディラック電子系のランダウ準位形成や量子(異常)ホール効果、バルクで反転対称性の破れたラッシュバ系において生じる量子振動現象などを低温・強磁場で観測して、その量子状態を明らかにすることを行っている。また、銅酸化物高温超伝導体や遷移金属酸化物薄膜などを作製し、高圧力下や高磁場下での輸送特性を測定して、超伝導転移温度の向上や新しい磁気輸送特性の創出を目指している。

### 主要メンバー

- (上級研究員) 大貫 惇睦
- (専任研究員) 川村 稔
- (研究員) 吉見 龍太郎
- (基礎特研) BELOPOLSKI Ilya Boris, 佐藤 雄貴

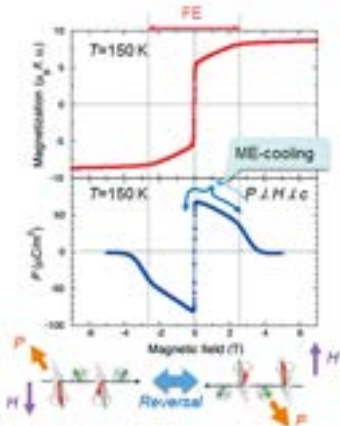
# 強相関量子構造研究チーム

Strong Correlation Quantum Structure Research Team



## マルチフェロイクY型六方晶フェライトの スピン起源強誘電性と電気マグノン

Y型六方晶フェライトは、スピネル型フェライトのブロック層と六方ペロブスカイト型フェライトのブロック層を交互に積層した構造を有し、各ブロックの磁気異性やブロック間の実効的な磁気相互作用は組成に依存する。その結果、温度と磁場をパラメータとして、様々な磁気秩序が出現する。特に、横滑り型の円錐磁性と二重ファン磁性の二種類の磁気秩序が逆ジャロシンスキー守谷型の機構によって電気分極を併せ持つことが予想される。我々は、BaSrCo<sub>2</sub>Fe<sub>11</sub>AlO<sub>22</sub>の磁化、電気分極、スピン偏極中性子散乱を測定し、ゼロ磁場条件で冷却した場合は交替型縦滑り円錐磁性が生じるものの、低温でc軸に垂直な方向に一度磁場を印加して再度ゼロ磁場にした場合は、二重ファン磁性が現れることを見出した。それに伴ってc軸とも磁場とも垂直な方向に電気分極が現れる。この電気分極は磁場を正負に掃引することによって繰り返し反転することができる。また、スピン偏極中性子非弾性散乱の測定により、二重ファン磁性相と交替型縦滑り円錐磁性相の双方で、テラヘルツ振動電場によるスピンの励起（電気マグノン）が予測される。



Y型六方晶フェライト BaSrCo<sub>2</sub>Fe<sub>11</sub>AlO<sub>22</sub> における磁場誘起電気分極反転と磁気秩序の変化

### 主要論文

1. V. Ukleev, O. Utesov, L. Yu, C. Luo, K. Chen, F. Radu, Y. Yamasaki, N. Kanazawa, Y. Tokura, T. Arima, J. S. White, "Signature of anisotropic exchange interaction revealed by vector-field control of the helical order in a FeGe thin plate", *Phys. Rev. Research* 3, 013094 (2021).
2. Y. Ishii, K. Yamamoto, Y. Yokoyama, M. Mizumaki, H. Nakao, T. Arima, Y. Yamasaki, "Soft-X-ray Vortex Beam Detected by Inline Holography", *Phys. Rev. Appl.* 14, 064069 (2020).
3. T. Nakajima, T. Oda, M. Hino, H. Endo, K. Ohishi, K. Kakurai, A. Kikkawa, Y. Taguchi, Y. Tokura, T. Arima, "Crystallization of magnetic skyrmions in MnSi investigated by neutron spin echo spectroscopy", *Phys. Rev. Research* 2, 043393 (2020).
4. V. Ukleev, Y. Yamasaki, O. Utesov, K. Shibata, N. Kanazawa, N. Jaouen, H. Nakao, Y. Tokura, T. Arima, "Metastable solitonic states in the strained itinerant helimagnet FeGe", *Phys. Rev. B* 102, 014416 (2020).
5. S. Gao, M. Hirschberger, O. Zaharko, T. Nakajima, T. Kurumaji, A. Kikkawa, J. Shiozaki, A. Tsukazaki, S. Kimura, S. Awaji, Y. Taguchi, T. Arima, Y. Tokura, "Ordering phenomena of spin trimers accompanied by a large geometrical Hall effect", *Phys. Rev. B* 100, 241115(R) (2019).

有馬 孝尚 博士 (理学)・チームリーダー  
takahisa.arima@riken.jp

### 研究分野

材料科学 / 物理学

### キーワード

X線散乱、中性子散乱、電子線回折、  
構造物性、イメージング

### 略歴

- 1988 東レ株式会社
- 1991 東京大学理学部 助手
- 1994 東京大学 博士 (理学) 取得
- 1995 東京大学工学系研究科 助手
- 1995 筑波大学物質工学系 助教授  
(2001-2006 ERATO 十倉スピン超構造プロジェクト グループリーダー)
- 2004 東北大学多元物質科学研究所 教授
- 2011 東京大学新領域創成科学研究科 教授 (現職)
- 2007 理化学研究所 放射光科学総合研究センター  
量子秩序研究グループ スピン秩序研究チーム  
チームリーダー
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター  
強相関物理部門 強相関量子構造研究チーム  
チームリーダー (現職)

### チーム紹介・概要



当チームは、強相関電子系物質における様々な創発物性の起源を原子レベルで明らかにする構造物性研究を行う。強相関電子系物質を舞台としたエネルギーや情報の変換には、物質中の原子、電子密度、電子スピン密度の空間分布と時間・空間の4次元空間における揺らぎが密接に関連している。これらの情報を得るために、単結晶、粉末、デバイスなどのさまざまな形態の試料に対して、主に放射光X線・中性子・高エネルギー電子などの量子ビームを用いた各種の散乱・分光・イメージングの手法による研究を行う。さらに、必要に応じて、新たな測定手法の開発や、測定の高度化も行う。

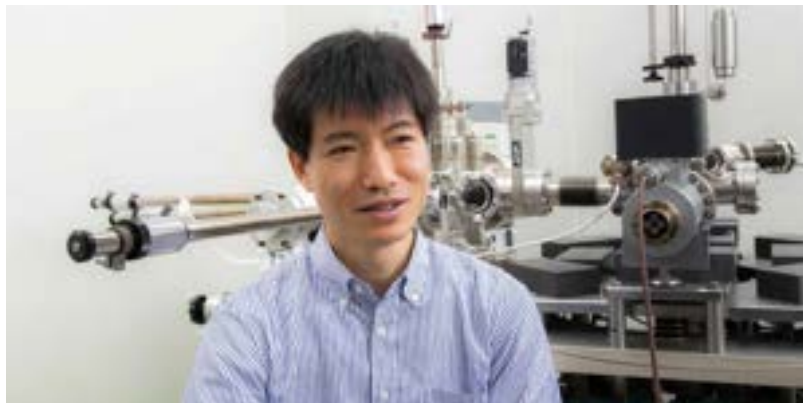
### 主要メンバー

(基礎特研)

鬼頭 俊介, 巖 正輝, GAUTAM Kamini

# 創発物性計測研究チーム

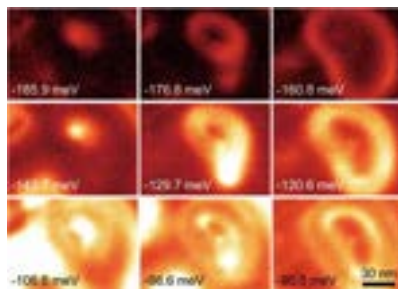
Emergent Phenomena Measurement Research Team



## トポロジカル絶縁体表面の質量を持たない電子の直接イメージング

近年発見されたトポロジカル絶縁体と呼ばれる物質群は、バルクは単なる絶縁体であるにもかかわらず表面が金属であり、しかも、表面金属状態を担う電子は質量を持たないという極めて興味深い性質を持っている。さらに、この表面電子のスピンを利用して情報を運ぶことができるため、スピントロニクスへの応用が期待されている。しかし、これらの興味深い性質はいずれも理論的な予言に留まっており、質量の無い電子が持つ性質の実験的な解明はほとんど進んでいない。

当チームでは、トポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  表面における質量を持たない電子のナノスケールでの空間構造を、走査型トンネル顕微鏡を用いて直接調べることに成功した。質量を持たない電子の性質は、磁場を印加することで顕著になる。磁場中で電子は周回運動するが、結晶の中に電荷を持つ欠陥があると、周回運動の重心はそれを取り巻くように移動し、「電子の輪」が形成される。我々は、この電子の輪の内部構造に、質量の無い電子特有の性質が現れることを見出した。この内部構造は、電子スピンの分布と密接な関係があり、将来のスピントロニクス応用へ向けた重要な手掛かりになると期待される。



異なるエネルギーを持つ電子に対する「電子の輪」

### 主要論文

1. T. Machida, Y. Yoshimura, T. Nakamura, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, C.-R. Hsing, C.-M. Wei, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and A. Takayama, "Superconductivity near the saddle point in the two-dimensional Rashba system  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Pb), *Phys. Rev. B*, 105, 064507 (2022).
2. S. Kasahara, H. Suzuki, T. Machida, Y. Sato, Y. Ukai, H. Murayama, S. Suetsugu, Y. Kasahara, T. Shibauchi, T. Hanaguri, and Y. Matsuda, "Quasiparticle Nodal Plane in the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State of  $\text{FeSe}$ ", *Phys. Rev. Lett.*, 127, 257001 (2021).
3. C. J. Butler, M. Yoshida, T. Hanaguri, and Y. Iwasa, "Doublonlike Excitations and Their Phononic Coupling in a Mott Charge-Density-Wave System", *Phys. Rev. X*, 11, 011059 (2021).
4. Y. Yasui, C. J. Butler, N. D. Khanh, S. Hayami, T. Nomoto, T. Hanaguri, Y. Motome, R. Arita, T. Arima, and S. Seki, "Imaging the coupling between itinerant electrons and localised moments in the centrosymmetric skyrmion magnet  $\text{GdRu}_2\text{Si}_2$ ", *Nature Commun.*, 11, 5925 (2020).
5. C. J. Butler, M. Yoshida, T. Hanaguri and Y. Iwasa, "Mottness versus unit-cell doubling as the driver of the insulating state in  $17\text{-TaS}_2$ ", *Nature Commun.*, 11, 2477 (2020).

花栗 哲郎 博士 (工学)・チームリーダー  
hanaguri@riken.jp

### 研究分野

物理学/工学/材料科学

### キーワード

走査型トンネル顕微鏡、超伝導、トポロジカル絶縁体

### 略 歴

- 1993 東北大学工学研究科応用物理学専攻 博士学位取得
- 1993 東京大学 教養学部 助手
- 1999 東京大学 新領域創成科学研究科 助教授
- 2004 理化学研究所 磁性研究室 専任研究員
- 2013 同 創発物性科学研究センター 強相関物理部門 創発物性計測研究チーム チームリーダー (現職)

### チーム紹介・概要



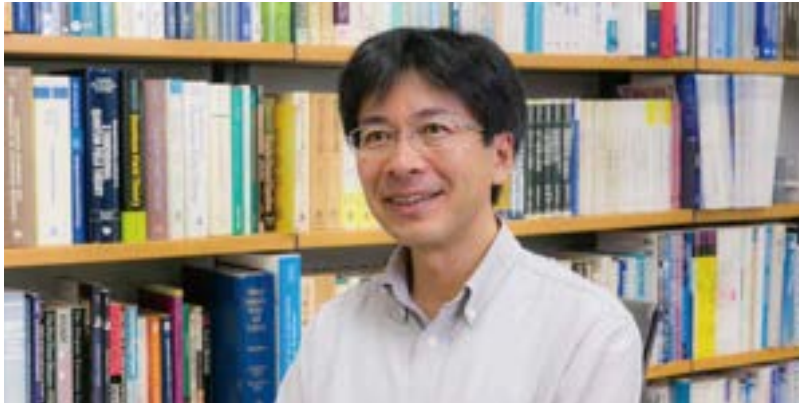
当チームでは、高温超伝導やトポロジカル量子現象といった固体内の電子多体系が示す創発現象の背景にある電子状態の実験的解明を行っている。主に用いる実験装置は、極低温、強磁場、超高真空の多重極限環境で動作する走査型トンネル顕微鏡である。現代の走査型トンネル顕微鏡技術を用いると、原子レベルの空間分解能とマイクロ電子ボルトに及ぶ高いエネルギー分解能で、電子状態に関する膨大な情報を含んだ「電子状態の地図」を作ることが可能となる。我々は、様々な物質の電子状態の地図を解析し、物質機能と電子状態の関係性を明らかにしている。また、走査型トンネル顕微鏡技術の高度化、高機能化に関する研究を行う他、未知の創発現象の発見を目指した全く新しい物性計測手法の開発を目指す。

### 主要メンバー

- (上級研究員) 町田 理
- (研究員) BUTLER Christopher John
- (基礎特研) 成塚 政裕

# 量子物性理論研究チーム

Quantum Matter Theory Research Team



## トポロジカル絶縁体とトポロジカル超伝導体を分類する

現代のITを支えるエレクトロニクスは、固体中の電子の量子力学的な運動を記述するバンド理論に基づいている。バンド理論によって金属・絶縁体・半導体の物性が説明され、トランジスタの発明につながった。ところが、これまでのバンド理論では見逃されてきた重要な物理が、21世紀に入って新たに見つかった。電子波動関数の幾何学的位相(ベリー位相)が運動量空間で非自明なトポロジーをもつことによって生じる、トポロジカル絶縁体がそれである。さらに、準粒子励起にエネルギーギャップが存在する超伝導体にも、同様にトポロジカル超伝導体というものがある。トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体には様々な種類があることが知られている。

我々は、対称性にもとづいてトポロジカル絶縁体・超伝導体を分類する一般論を構築し、各空間次元で整数のトポロジカル数で分類されるトポロジカル絶縁体・超伝導体が3種類存在し、2値のトポロジカル数で分類されるトポロジカル絶縁体・超伝導体が2種類存在することを明らかにした。さらに、これらのトポロジカル絶縁体・超伝導体に対して、結晶格子のもつ対称性や電子間相互作用の効果を研究している。



連続変形で互に移り変われるマグカップとドーナツはトポロジー的には同じ形である。絶縁体中の電子の波動関数はトポロジーによって分類できる。

### 主要論文

1. S. Kobayashi and A. Furusaki, "Fragile topological insulators protected by rotation symmetry without spin-orbit coupling", *Phys. Rev. B*, 104, 195114 (2021).
2. S. Furukawa and T. Momoi, "Effects of Dzyaloshinskii-Moriya interactions in Volborthite: Magnetic orders and thermal Hall effect", *J. Phys. Soc.*, 89, 034711 (2020).
3. M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo, "Spin current generation in organic antiferromagnets", *Nat. Commun.*, 10, 4305 (2019).
4. S. Onoda and F. Ishii, "First-principles design of the spinel iridate  $\text{Ir}_2\text{O}_4$  for high-temperature quantum spin ice", *Phys. Rev. Lett.*, 122, 067201 (2019).
5. Y. Fuji and A. Furusaki, "Quantum Hall hierarchy from coupled wires", *Phys. Rev. B*, 99, 035130 (2019).

古崎 昭 博士 (理学)・チームリーダー

furusaki@riken.jp

### 研究分野

物理学 / 材料科学

### キーワード

電子相関、フラストレート磁性体、トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導

### 略歴

- 1991 東京大学工学部物理工学科 助手
- 1993 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士学位取得
- 1993 米国 マサチューセッツ工科大学 博士研究員
- 1995 東京大学大学院工学系研究科 助手
- 1996 京都大学基礎物理学研究所 助教授
- 2003 理化学研究所 古崎物性理論研究室 主任研究員 (現職)
- 2013 同 創発物性科学研究中心 強相関物理部門 量子物性理論研究チーム チームリーダー (現職)

### チーム紹介・概要



当チームは、強い電子相関や量子性の効果によって固体中の多電子系が低温で示す新奇な量子相を探究し、その相に特徴的な輸送現象や磁性などの電子物性や相転移の臨界現象に関する理論的研究を行っている。具体的には、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体、フラストレート量子磁性体、遷移金属酸化物や分子性導体の強相関電子系を主な研究対象としている。個々の物質の電子状態の特徴をとらえた理論モデルを構築し、そのモデルの量子統計力学を場の理論などの解析的手法やモンテカルロ法などの計算物理的手法を併用して解くことにより、物質中の電子系が創発する多彩な相を明らかにすることを目指している。

### 主要メンバー

(専任研究員) 桃井 勉, 小野田 繁樹, 妹尾 仁嗣  
(研究員) 小林 伸吾  
(特別研究員) 立石 幾真

# 計算量子物性研究チーム

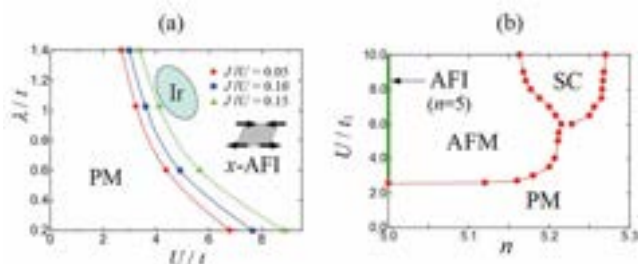
Computational Quantum Matter Research Team



## スピン軌道相互作用がもたらす新奇な絶縁体のメカニズムと超伝導の可能性

固体中の電子はクーロン相互作用、電子 - 格子相互作用、スピン軌道相互作用といった様々な影響の下で運動し、各物質固有の性質を生み出している。中でも近年、スピン軌道作用がもたらす興味深い物性に対する理解が進展し、注目を集めている。その一例である5d電子系遷移金属酸化物  $Sr_2IrO_4$  では、強いスピン軌道相互作用によってスピンと軌道の自由度が複雑に絡み合い、特異な量子状態が形成されていると考えられている。また、銅酸化物高温超伝導体の母物質と複数の類似点を持つことから、新たな超伝導物質の候補としても期待が持たれている。

当チームでは、複数の数値計算手法を用いて  $Sr_2IrO_4$  をモデル化した3軌道ハバード模型の詳細な電子状態を解析した。その結果、強いスピン軌道相互作用の下で有効的な全角運動量  $J_{\text{eff}}=1/2$  が良い量子数となり、スピンと軌道が結合して出来た“擬スピン”が秩序化した反強磁性絶縁体 (図 (a) の x-AFI) が実現することを明らかにした。また、この絶縁体に電子をドーピングすることで  $d_{x^2-y^2}$  波 “擬スピン-重項” 超伝導 (図 (b) の SC) が誘起され得ることを理論的に提案した。



スピン軌道相互作用を取り入れた3軌道ハバード模型の基底状態相図 (a) 電子密度  $n=5$ 、(b)  $n>5$

### 主要論文

1. F. Lange, S. Ejima, J. Fujimoto, T. Shirakawa, H. Fehske, S. Yunoki, and S. Maekawa, "Generation of current vortex by spin current in Rashba systems", *Phys. Rev. Lett.* 126, 157202 (2021).
2. K. Seki and S. Yunoki, "Emergence of a thermal equilibrium in a subsystem of a pure ground state by quantum entanglement", *Phys. Rev. Research* 2, 043087 (2020).
3. T. Shirakawa, S. Miyakoshi, and S. Yunoki, "Photoinduced eta pairing in the Kondo lattice model", *Phys. Rev. B* 101, 174307 (2020).
4. T. Kaneko, T. Shirakawa, S. Sorella, and S. Yunoki, "Photoinduced eta pairing in the Hubbard model", *Phys. Rev. Lett.* 122, 077002 (2019).
5. S. Sorella, K. Seki, O. O. Brovko, T. Shirakawa, S. Miyakoshi, S. Yunoki, and E. Tosatti, "Correlation-driven dimerization and topological gap opening in isotropically strained graphene", *Phys. Rev. Lett.*, 121, 066402 (2018).

柚木 清司 博士 (工学)・チームリーダー  
yunoki@riken.jp

### 研究分野

物理学 / 材料科学

### キーワード

強相関電子系、磁性、超伝導、  
計算物性物理学

### 略 歴

- 1996 名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻 博士課程修了
- 1996 米国 国立強磁場研究所 博士研究員
- 1999 オランダ グローニンゲン大学物質科学研究センター 博士研究員
- 2001 イタリア 高等研究所 (SISSA) 博士研究員
- 2006 米国 オークリッジ国立研究所 / テネシー大 長期研究員 / リサーチ准教授
- 2008 理化学研究所 柚木計算物性物理研究室 准主任研究員
- 2010 同 計算科学研究機構 研究部門 量子系物質科学研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 強相関物理部門 計算量子物性研究チーム チームリーダー (現職)
- 2017 同 柚木計算物性物理研究室 主任研究員 (現職)
- 2018 同 計算科学研究センター 研究部門 量子系物質科学研究チーム チームリーダー (現職)
- 2021 同 量子コンピュータ研究センター 量子計算科学研究チーム チームリーダー (現職)

### チーム紹介・概要



固体中の電子は各物質の格子構造を反映したエネルギーバンド中を運動しているが、クーロン相互作用、電子 - 格子相互作用、スピン軌道相互作用といった様々な相互作用は電子の運動に非自明な効果を与え、興味深い量子現象を引き起こしている。当チームでは、これらの相互作用が協力的、あるいは競合的に働くことによって創発される様々な量子現象を、最新の計算物理学的手法を駆使して理論的に解明することを目指す。主に遷移金属酸化物、トポロジカル物質、およびそれらから作られたヘテロ構造体などを対象に、新奇な量子現象の発現機構の解明や、新物質創成の提案などを目標として研究を行っている。

### 主要メンバー

(上級研究員) 前川 禎通  
(研究員) 新城 一矢

# 計算物質科学研究チーム

First-Principles Materials Science Research Team

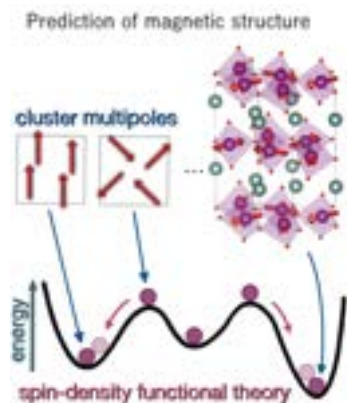


## 第一原理磁気構造予測

磁性体の物性は磁気構造の対称性によって決められる。しかしながら、ノンコリニア磁性体のように磁気構造が複雑で自由度が大きい場合、結晶構造の情報だけからスピン配置を予測することは難しい問題である。この問題に対し、我々は磁気構造をクラスター多極子で表現するアプローチとスピン密度汎関数理論を組み合わせて効率的な第一原理磁気構造予測法を構築した。

この方法では、磁気構造を多極子展開することでエネルギー的に安定になる可能性の高い構造を効率的に生成する。生成した構造を初期配置としてスピン密度汎関数理論による計算を行い、安定構造を探索する。131の磁性体についてベンチマーク計算を行ったところ、3000程度の計算（ひとつの物質あたり20程度の計算）でほぼすべての物質について実験磁気構造の再現に成功した。

この方法に従えば結晶構造のみが知られている磁性体に対する磁気構造と物性予測のハイスループット計算が可能となり、今後機能磁性体の系統的探索への応用が期待される。



磁気構造予測法の概念図。

### 主要論文

1. Y. Nomura, R. Arita, "Superconductivity in infinite-layer nickelates", *Rep. Prog. Phys.*, 85 052501 (2022).
2. M.-T. Huebsch, T. Nomoto, M.-T. Suzuki, R. Arita, "Benchmark for Ab Initio Prediction of Magnetic Structures Based on Cluster-Multipole Theory", *Phys. Rev. X* 11, 011031 (2021).
3. T. Nomoto, T. Koretsune, R. Arita, "Formation Mechanism of the Helical Q Structure in Gd-Based Skyrmion Materials", *Phys. Rev. Lett.* 125, 117204 (2020).
4. J. A. Flores-Livas, L. Boeri, A. Sanna, G. Profeta, R. Arita, M. Eremets, "A perspective on conventional high-temperature superconductors at high pressure: Methods and materials", *Phys. Rep.* 856, 1-78 (2020).
5. A. Sakai, S. Minami, T. Koretsune, T. Chen, T. Higo, Y. Wang, T. Nomoto, M. Hirayama, S. Miwa, D. Nishio-Yamane, F. Ishii, R. Arita and S. Nakatsuji, "Iron-based binary ferromagnets for transverse thermoelectric conversion", *Nature* 581, 53 (2020).

有田 亮太郎 博士 (理学)・チームリーダー  
arita@riken.jp

### 研究分野

物理学／材料科学

### キーワード

第一原理計算、理論物質設計、強相関電子系

### 略歴

- 2000 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程修了
- 2000 東京大学大学院理学系研究科 助手
- 2004 マックスプランク固体研究所 博士研究員
- 2006 理化学研究所 古崎物性理論研究室 研究員、専任研究員
- 2008 東京大学大学院工学系研究科理工学専攻 准教授
- 2011 科学技術振興機構さきがけ
- 2014 理化学研究所創発物性科学研究センター 強相関物理部門 計算物質科学研究チーム チームリーダー (現職)
- 2018 東京大学大学院工学系研究科理工学専攻 教授
- 2022 東京大学先端科学技術研究センター 教授 (現職)

### チーム紹介・概要



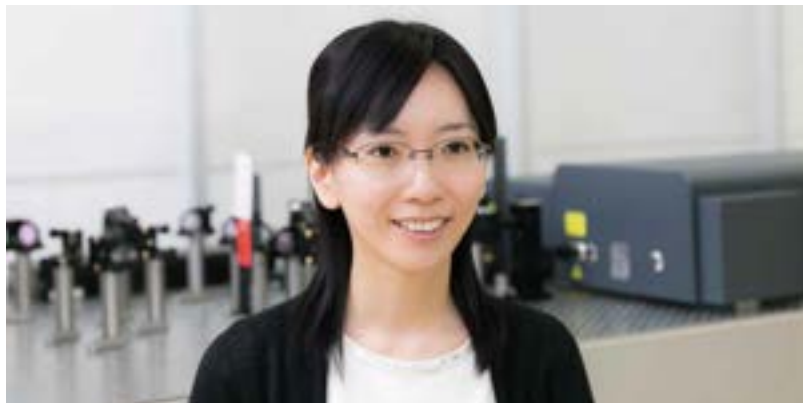
当チームでは、非経験的計算手法によって、物性理論における新概念と密接に関連する物質や機能物質としてユニークな可能性をもつ物質の電子物性を調べている。特に銅酸化物、鉄系超伝導体、有機・炭素系超伝導体、5d 遷移金属化合物、重い電子系、巨大ラッシュバ系、トポロジカル絶縁体、ゼオライトなどといった強相関電子系やトポロジカル物質に興味を持っている。より長期的には、多体効果に由来する新奇物性の予言や物質設計の新しい指導原理の確立を目指している。密度汎関数理論の拡張や密度汎関数理論とモデル計算法の融合など第一原理電子状態計算の方法論開発にも興味をもって取り組んでいる。

### 主要メンバー

- (上級研究員) 酒井 志朗
- (研究員) 村上 雄太
- (基礎特研) CHEN Hsiao-Yi
- (特別研究員) 森 仁志

# 電子状態スペクトロスコピー研究チーム

Electronic State Spectroscopy Research Team



石坂 香子 博士 (工学)・チームリーダー  
kyoko.ishizaka@riken.jp

## 研究分野

物理学／材料科学

## キーワード

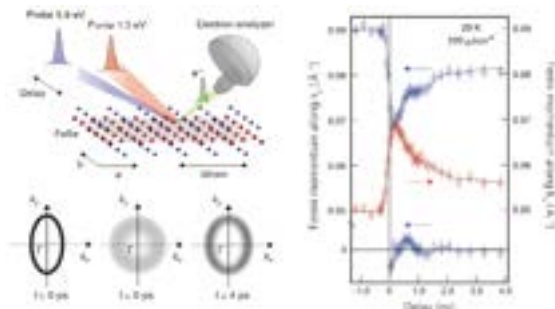
超高速時間分解電子顕微鏡、光電子分光、強相関電子系、超伝導、トポロジカル物質

## 略 歴

- 2004 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程修了
- 2004 東京大学物性研究所 助手
- 2010 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 准教授
- 2014 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 准教授
- 2016 理化学研究所 創発物性科学研究センター 電子状態スペクトロスコピー研究チーム チームリーダー (現職)
- 2018 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 教授 (現職)

## 鉄系超伝導体における 超高速ネマティック電子励起の実時間計測

電子の回転対称性が自発的に破れた液晶的な量子状態として、電子ネマティック相が注目されている。鉄系や銅酸化物の高温超伝導体では、ネマティック秩序やそのゆらぎが超伝導発現において重要な役割を果たす可能性が示唆されている。しかし、これまでの研究は主に熱平衡下での実験に限られており、ネマティック固有の励起やダイナミクスは結晶格子との結合により凍結し、いまだ観測できていない。我々はフェムト秒光パルスにより鉄系超伝導体 FeSe の電子ネマティック状態を攪乱し、時間、エネルギー、運動量、軌道を分解可能な光電子分光測定により、電子系の超高速ダイナミクスを検出した。楕円型フェルミ面の異方性を直接観察することにより、強励起時にはネマティシティが急速に消失した後に減衰振動する様子が観測された。この短寿命のネマティック振動は、Fe 3d の  $xz$  と  $yz$  軌道成分の不均衡とも対応しており、励起光強度の関数として閾値的振る舞いを示す。このようなリアルタイム観察により、格子から切り離された電子ネマティック励起の性質が明らかになった。



時間分解角度分解光電子分光 (左上)、フェルミ面過渡応答の模式図 (左下) および得られたフェルミ波数の超高速時間変化 (右)

## 主要論文

1. T. Shimojima, A. Nakamura, X. Z. Yu, K. Karube, Y. Taguchi, Y. Tokura, K. Ishizaka, "Nano-to-micro spatiotemporal imaging of magnetic skyrmion's life cycle", *Sci. Adv.* 7, eabg1322/1-8 (2021).
2. A. Nakamura, T. Shimojima, Y. Chiashi, M. Kamitani, H. Sakai, S. Ishiwata, H. Li, and K. Ishizaka, "Nanoscale Imaging of Unusual Photoacoustic Waves in Thin Flake VTe<sub>2</sub>", *Nano Lett.* 20, 7, 4932 (2020).
3. N. Mitsuishi, T. Shimojima, K. Ishizaka et al., "Switching of band inversion and topological surface states by charge density wave", *Nature Commun.* 11, 2466 (2020).
4. T. Shimojima, Y. Suzuki, A. Nakamura, N. Mitsuishi, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Ishida, S. Shin and K. Ishizaka, "Ultrafast nematic-orbital excitation in FeSe", *Nature Commun.* 10, 1946 (2019).
5. A. Nakamura, T. Shimojima, M. Matsuura, Y. Chiashi, M. Kamitani, H. Sakai, S. Ishiwata, H. Li, A. Oshiyama and K. Ishizaka, "Evaluation of photo-induced shear strain in monoclinic VTe<sub>2</sub> by ultrafast electron diffraction", *Appl. Phys. Express* 11, 092601 (2018).

## チーム紹介・概要



当チームでは、多様な量子物性や機能を示す物質における電子状態の解明を目指した実験を行っている。電子のエネルギー、運動量、スピンを分解して測定することができる数少ない手法であるスピン角度分解光電子分光を駆使することにより、超伝導体や熱電材料をはじめとする新物質の理解や強相関電子系における多体効果、トポロジカルな量子状態の解明などを推進する。また、パルスレーザーを用いた超高速時間分解電子顕微鏡による非平衡状態の時空間構造計測など、磁気・格子・電荷テクスチャーを持つ強相関物質やナノ物質、デバイスなどを対象とした新しい計測手法の開発にも取り組んでいる。

## 主要メンバー

(上級研究員) 下志万 貴博  
(特別研究員) 中村 飛鳥, 三石 夏樹



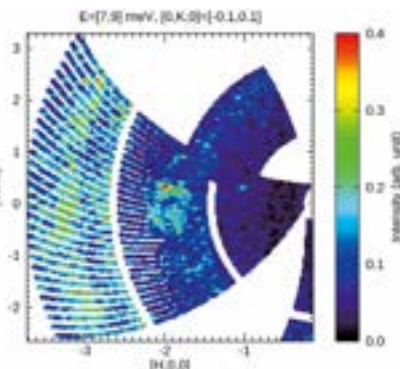
# 強相関スピン研究チーム

Strongly Correlated Spin Research Team



## 空間反転対称性の破れたLaNiC<sub>2</sub>の 格子振動と超伝導発現機構

LaNiC<sub>2</sub>は、T<sub>c</sub>=2.7Kの空間反転対称性が破れた超伝導体である。また、理論家が、この物質について、温度の低下に伴い格子系がコーン異常を示すことを予言している。希土類金属ホウ炭化物超伝導体(例:YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C)は、温度の低下に伴い、フェルミ面のネスティングが期待される特定のqでコーン異常が観測されるばかりでなく、その揺動スペクトラムが超伝導相でレゾナンス的な振る舞いを示すことが知られている。我々は、LaNiC<sub>2</sub>でもYNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>Cと同様、温度の低下に伴うコーン異常、および、超伝導相でのレゾナンス的な振る舞いが観測される可能性があると考え、その検証のために中性子非弾性散乱実験を行っている。2020年度は、新たな中性子実験を行うことは不可能であったため前年度日本原子力研究開発機構のJ-PARC物質生命科学実験施設内、高分解能チョッパー分光器HRCで測定した4次元データの解析を行った。結果、縦波横浪の音響波が特定され分散関係をほぼ確定することに成功した。また、より高エネルギー側に一定量のフォノンスペクトラルが観測されていることも明らかになったが、散乱強度が弱く、分散関係まで特定することは難しいことがわかった。今後、実験に使う単結晶量を大幅に増やして、同機構の実験用原子炉JRR-3にて中性子非弾性散乱実験を行うことでこの系の格子揺らぎの分散関係の全貌、および、コーン異常、レゾナンス的な振る舞いの有無について明らかにすることを計画している。



(H 0 L)に観測された格子励起スペクトラム (T=300K, 7<E<9 meV)

### 主要論文

1. M. Soda, S. Itoh, T. Yokoo, G. Ehlers, H. Kawano-Furukawa, T. Masuda, "Magnetic correlations in on kagome and triangular lattices", *Phys. Rev. B*, 101, 214444 (2020).
2. A. Yokoyama, M. Soda, H. Yoshizawa, H. Kawano-Furukawa, "Memory Effect in Spin Glass Ni<sub>0.48</sub>Mn<sub>0.55</sub>TiO<sub>3</sub>", *JPS Conf. Proc.*, 30, 011185 (2020).
3. M. Soda, T. Hong, M. Avdeev, H. Yoshizawa, T. Masuda, and H. Kawano-Furukawa, "Neutron scattering study of the quasi-one-dimensional antiferromagnet Ba<sub>2</sub>CoSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>", *Phys. Rev. B*, 100, 144410 (2019).
4. M. Takahashi, H. Takeya, A.A. Aczel, T. Hong, M. Matsuda, H. Kawano-Furukawa, "Neutron scattering study of spin density wave and weak ferromagnetic orders in Tb<sub>0.47</sub>Y<sub>0.53</sub>Ni<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C", *Physica B: Condensed Matter* 551, 108-110 (2018).
5. M. Soda, L.-J. Chang, M. Matsumoto, V. O. Garlea, B. Roessli, J. S. White, H. Kawano-Furukawa, T. Masuda, "Polarization analysis of magnetic excitation in multiferroic Ba<sub>2</sub>CoGe<sub>2</sub>O<sub>7</sub>", *Phys. Rev. B*, 97, 214437 (2018).

古川はづき 博士(理学)・チームリーダー  
hazuki.furukawa@riken.jp

### 研究分野

物理学／材料科学

### キーワード

強相関電子系、磁性、超伝導、スキルミオン、中性子散乱

### 略歴

- 1995 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程修了
- 1995 理化学研究所 基礎科学特別研究員
- 1998 米国 オークリッジ国立研究所 博士研究員
- 1999 お茶の水女子大学 理学部 助教授
- 1999 科学技術振興機構 さきがけ研究員
- 2003 お茶の水女子大学 理学部 教授
- 2007 同大学大学院 人間文化創成科学研究科 教授
- 2015 同大学 基幹研究院自然科学系 教授(現職)
- 2016 理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関スピン研究チーム チームリーダー(現職)

### チーム紹介・概要



当チームでは、中性子散乱法により強相関電子系の磁性・構造の静的・動的振る舞いを観測、物性特性との関連性を検証し、その制御法と機能強化法の研究を行う。新奇超伝導体の量子状態とスピン軌道相互作用の役割解明、FFLO相やヘリカル磁束相の検証、およびトポロジカル磁性体におけるスキルミオン構造とそのダイナミクス、などの課題に取り組む。

### 主要メンバー

(技師) FOLEY Edward

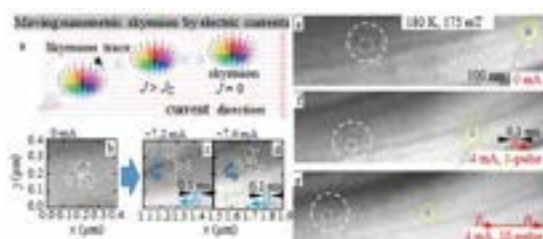
# 電子状態マイクロスコーピー研究チーム

Electronic States Microscopy Research Team



## 電流パルスで単一スキルミオンとそのクラスタの駆動ダイナミクスの直接観察

スキルミオン (Sk) はトポロジカル数「-1」を有したトポロジカル粒子であるので、基礎物性研究分野やスピントロニクス分野で大変注目されている。Sk は微小電流で移動させられることが提唱されているが、単一 Sk ではまだ実証されていなかった。当チームは、小さな切り欠きをつけたりせん磁性体 FeGe 薄片に、磁壁駆動電流密度より3桁低い微小・超短パルス電流で直径 80 nm の単一 Sk と Sk クラスタの移動に成功した。さらに、パルス電流の刺激により Sk クラスタの回転運動を初めて直接観察した。単一 Sk を生成するため、「切り欠き」をつけたりせん磁性体 FeGe の薄片を作成した。この切り欠きの導入により局所的にスピン流が生成でき、電流で単一 Sk を誘起することが出来る。図 a は電流下の Sk ホール運動の模式図である。ローレンツ顕微鏡を用いた実空間観察により、3個Skからなるクラスタ(b)を電流パルスで刺激すると、クラスタは反時計回りに回転しながらホール運動することが世界で初めて観察された(図c-d)。さらに、磁壁を移動する電流閾値より3桁小さい超短電流パルスで、単一 Sk と Sk クラスタのホール運動が観察された(図e-g)。



(a) 電流下のスキルミオンホール運動の模式図。  
 (b-d) 電流パルス印加前 (b) と印加後 (c-d) のスキルミオンクラスタの回転運動のローレンツ電子顕微鏡像。(e-g) 電流パルス印加前 (e) と印加後 (f-g) のローレンツ電子顕微鏡像。

### 主要論文

- X. Z. Yu, F. Kagawa, S. Seki, M. Kubota, J. Masell, F. S. Yasin, K. Nakajima, M. Nakamura, M. Kawasaki, N. Nagaosa and Y. Tokura, "Real-space observations of 60-nm skyrmion dynamics in an insulating magnet under low heat flow", *Nat. Commun.* 12, 5079 (2021).
- L. C. Peng, K. Karube, Y. Taguchi, N. Nagaosa, Y. Tokura and X. Z. Yu, "Dynamic transition of current-driven single-skyrmion motion in a room-temperature chiral-lattice magnet", *Nat. Commun.* 12, 6797 (2021).
- L. C. Peng, R. Takagi, W. Koshibae, K. Shibata, K. Nakajima, T-h. Arima, N. Nagaosa, S. Seki, X.Z. Yu and Y. Tokura, "Controlled transformation of skyrmions and antiskyrmions in a non-centrosymmetric magnet", *Nat. Nanotech.*, 15, 181 (2020).
- X. Z. Yu, W. Koshibae, Y. Tokunaga, K. Shibata, Y. Taguchi, N. Nagaosa and Y. Tokura, "Transformation between meron and skyrmion topological spin textures in a chiral magnet", *Nature*, 564, 95 (2018).
- X. Z. Yu, Y. Onose, N. Kanazawa, J. H. Park, J. H. Han, Y. Matsui, N. Nagaosa and Y. Tokura, "Real-space observation of two-dimensional skyrmion crystal", *Nature*, 465, 901 (2010).

于 秀珍 博士(理学)・チームリーダー  
 yu\_x@riken.jp

### 研究分野

物理学/工学/材料科学

### キーワード

電子状態、ローレンツ顕微鏡法、分析電子顕微鏡法、高分解能電子顕微鏡法、位相差顕微鏡法

### 略 歴

- 1990 中国吉林大学大学院電子科学系半導体物理専攻 博士前期課程修了
- 2002 科学技術振興機構 ERATO 十倉スピン超構造プロジェクト 技術員
- 2006 物質材料研究機構 ナノ計測センター 先端電子顕微鏡グループ エンジニア
- 2008 東北大学理学研究科物理学専攻 博士学位取得
- 2008 物質材料研究機構 ナノ計測センター 先端電子顕微鏡グループ 研究員
- 2010 科学技術振興機構 ERATO十倉マルチフェロイクスプロジェクト 研究員
- 2011 理化学研究所 基幹研究所 強相関量子科学研究グループ 特別研究員
- 2013 同 創発物性科学研究センター 強相関物理部門 強相関物性研究グループ 上級研究員
- 2017 同 電子状態マイクロスコーピー研究チーム チームリーダー (現職)

### チーム紹介・概要



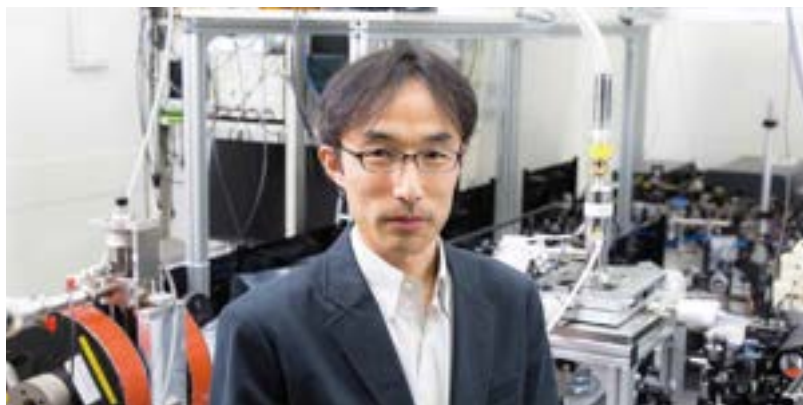
当チームは、原子レベル空間分解能を有する電子顕微鏡を駆使して、強相関電子秩序やスキルミオンなどのトポロジカルスピントクスチャーの微視的磁気状態とそのダイナミクスの実空間観察を行う。超高速電子線イメージングや微視的磁場・電場の定量計測をはじめとする各種電子線分光法を用いて、高温超伝導材料、遷移金属カルコゲナイト材料、極性強磁性材料やヘテロ界面薄膜などの電子状態、元素分布、界面構造、相転移などに関する知見を得る。このようなナノスケール電子状態のマイクロスコーピー研究により、強相関電子材料における創発現象の発見、さらには次世代のメモリ素子への応用を展開する。

### 主要メンバー

(基礎特研) PENG Licong, YASIN Sami Fehmi  
 (特別研究員) GUANG Yao, 森 峻祐  
 (テクスタ I) 中島 清美

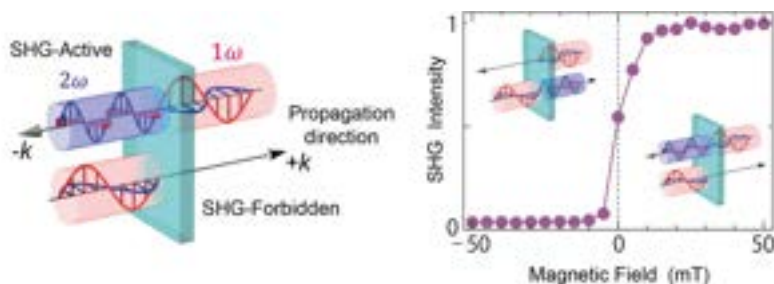
# 創発光物性研究チーム

Emergent Photodynamics Research Team



## 光第二次高調波発生のダイオード効果

空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れたマルチフェロイック物質では、光の進行方向の反転により光応答が変化する非相反光学効果が生じる。これまで、透過、発光、散乱、屈折等、線形光学過程において多彩な非相反効果が報告されてきた。我々は非線形光学過程における非相反効果に着目し、 $\text{CuB}_2\text{O}_4$  における非相反光第二次高調波発生の測定を行った。非相反光学効果は磁気双極子遷移と電気双極子遷移の干渉によって生じる。一般に前者は後者よりも圧倒的に小さいため、通常は非相反性が無視できるほど小さくなる。我々は、Cu サイトの磁気双極子遷移が共鳴励起によって増大し、非共鳴の電気双極子遷移と同程度の大きさを持つことを発見した。その結果、両者が同振幅で干渉し、位相の制御により高調波発生強度が 97% 変化するほぼ完全な非線形非相反光学効果を実現した。さらにこの非相反性は、わずか 10 mT の磁場によって反転可能であることを示した。



(左) 非相反光第二次高調波発生 (SHG) の模式図 (右) SHG 強度の磁場依存性

### 主要論文

1. S. Toyoda, M. Fiebig, L. Forster, T. Arima, Y. Tokura, and N. Ogawa, "Writing of strain-controlled multiferroic ribbons into  $\text{MnWO}_4$ ", *Nature Commun.* 12, 6199 (2021).
2. S. Toyoda, M. Fiebig, T. Arima, Y. Tokura, and N. Ogawa, "Nonreciprocal second harmonic generation in a magnetoelectric material", *Sci. Adv.* 7, eabe2793 (2021).
3. N. Ogawa, L. Köhler, M. Garst, S. Toyoda, S. Seki, and Y. Tokura, "Nonreciprocity of spin-waves in the conical helix state", *Proc. Natl. Acad. Sci.* 118, e2022927118 (2021).
4. M. Sotome, M. Nakamura, F. Fujioka, M. Ogino, Y. Kaneko, T. Morimoto, Y. Zhang, M. Kawasaki, N. Nagaosa, Y. Tokura, and N. Ogawa, "Spectral dynamics of shift-current in ferroelectric semiconductor  $\text{SbSI}$ ", *Proc. Natl. Acad. Sci.* 116, 1929 (2019).
5. N. Ogawa, R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, and Y. Tokura, "Zero-bias photocurrent in ferromagnetic topological insulator", *Nat. Commun.* 7, 12246 (2016).

小川 直毅 Ph.D.・チームリーダー

naoki.ogawa@riken.jp

### 研究分野

物理学／材料科学／工学

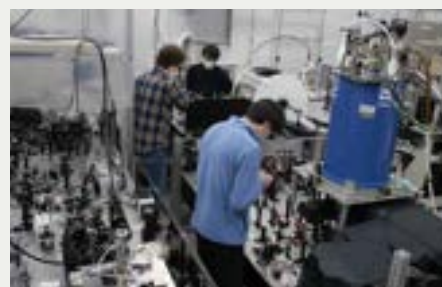
### キーワード

強相関電子系、超高速 / 広帯域分光、シフトカレント / 光電流分光、スピントロニクス

### 略歴

- 2004 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程修了
- 2004 米国 カリフォルニア大学アーバイン校 博士研究員
- 2004 日本学術振興会 特別研究員 (PD)
- 2006 東京大学 先端科学技術研究センター 特任助手
- 2008 同 助教
- 2012 理化学研究所 強相関量子科学研究グループ 基幹研究所研究員
- 2013 同 創発物性科学研究センター 上級研究員
- 2015 同 創発物性科学研究センター 創発光物性研究ユニット ユニットリーダー
- 2017 科学技術振興機構 さきがけ研究者
- 2018 同 創発物性科学研究センター 創発光物性研究チーム チームリーダー (現職)
- 2020 東京大学大学院工学系研究科 教授 (委嘱) (現職)

### ユニット紹介・概要



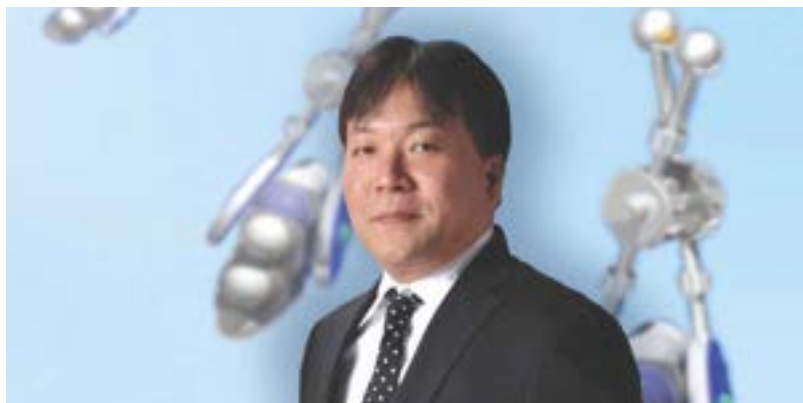
強い電子相関やスピン軌道相互作用、トポロジータを特徴とするバルク結晶および薄膜・界面において、創発光物性の探索と非平衡電子・スピンの制御を行う。特に光の有する広範なスペクトル、フェムト秒の時間分解能、偏光の自由度等を駆使し、シフトカレントの超高速分光、ディラック / ワイル電子によるスピン流生成やトポロジカル磁気秩序の操作など、物質に根ざした新規物性の開拓、その精密計測、また素励起の時空間発展の可視化を目指す。

### 主要メンバー

(特別研究員) WANG Ziqian

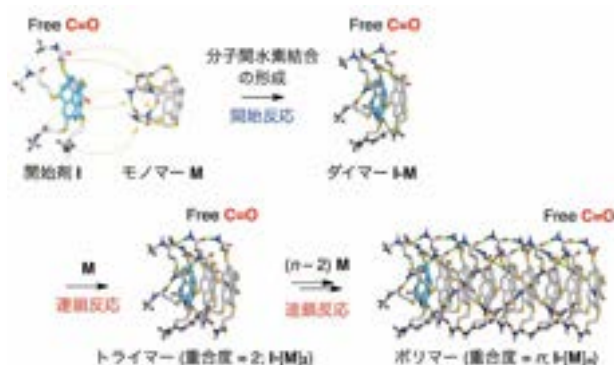
# 創発ソフトマター機能研究グループ

Emergent Soft Matter Function Research Group



## 原料を混ぜるだけ、 超分子ポリマーの精密合成法の開発

原料を混ぜるだけで合成でき、容易にリサイクルが可能な超分子ポリマーは、次世代の材料として注目を集めている。しかしながら超分子重合は本質的に逐次重合の機構で進行するため、長さや多分散度を制御した精密合成が実現できていなかった。当グループではコラヌレンと呼ばれるお椀状分子を用いることで、側鎖のアミド基を分子内で環状に水素結合を形成させ、モノマーの自発的な超分子重合（モノマー間での分子間水素結合形成）を抑制することに成功した。また同時に、モノマーのアミド基をメチル化した誘導体が開始剤として働くことを見出した。この開始剤とモノマーを常温・常圧で混ぜると、開始剤とモノマーの仕込み比に応じた単分散の超分子ポリマーが得られ、超分子重合を連鎖重合様式で実現することに初めて成功した。混ぜるだけで精密に超分子ポリマーを合成できる本手法は、今後の材料科学において様々な応用が期待される。



超分子連鎖重合の模式図

### 主要論文

1. Z. Chen, Y. Suzuki, A. Imayoshi, X. Ji, K. V. Rao, Y. Omata, D. Miyajima, E. Sato, A. Nihonyanagi, and T. Aida, "Solvent-free autocatalytic supramolecular polymerization", *Nature Mater.*, 21, 253 (2022).
2. W. Meng, S. Kondo, T. Ito, K. Komatsu, J. Pirillo, Y. Hijikata, Y. Ikuhara, T. Aida, and H. Sato, "An elastic metal-organic crystal with densely catenated backbone", *Nature*, 598, 298 (2021).
3. H. Huang, H. Sato, J. Pirillo, Y. Hijikata, Y. S. Zhao, S. Z. D. Cheng, and T. Aida, "Accumulated lattice strain as an internal trigger for spontaneous pathway selection", *J. Am. Chem. Soc.*, 143, 15319 (2021).
4. Y. Yanagisawa, Y. Nan, K. Okuro, and T. Aida, "Mechanically robust, readily repairable polymers via tailored noncovalent cross-linking", *Science*, 359, 72 (2018).
5. J. Kang, D. Miyajima, T. Mori, Y. Inoue, Y. Itoh, and T. Aida, "A rational strategy for the realization of chain-growth supramolecular polymerization", *Science*, 347, 646 (2015).

相田 卓三 工学博士・グループディレクター  
takuzo.aida@riken.jp

### 研究分野

化学／材料科学

### キーワード

ソフトマテリアル、分子設計、自己組織化、エネルギー変換、生体模倣、刺激応答材料、電子機能材料、光電変換材料、環境低負荷材料

### 略 歴

- 1984 東京大学大学院工学系研究科合成化学専攻 博士課程修了
- 1984 同 助手/講師
- 1991 同 助教授
- 1996 同 教授 (現職)
- 2000 科学技術振興事業団 ERATO相田ナノ空間プロジェクト 総括責任者
- 2007 理化学研究所 物質情報変換化学研究グループ グループディレクター
- 2010 同 機能性ソフトマテリアル研究グループ グループディレクター
- 2011 同 光電変換研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 副センター長 (現職)
- 2013 同 超分子機能化学部門 創発ソフトマター機能研究グループ グループディレクター (現職)

### グループ紹介・概要



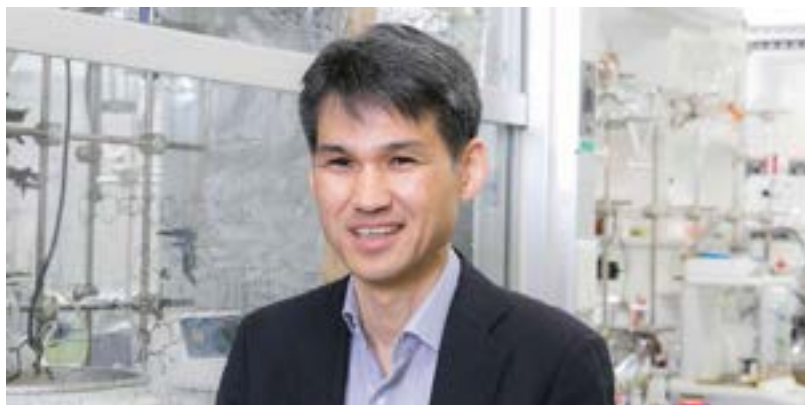
地球規模のエネルギー問題・環境問題に世界的な注目が集まる中、化学者に課せられた責務は重大である。当グループでは、分子レベル・ナノレベルでの構造や物性を精密に制御した材料の開発を通じ、これらの問題解決に繋がる材料科学の学理樹立を目指す。具体的には、(1)ユビキタス元素からなる新規有機触媒による高効率な水の光分解法の開発、(2)溶液キャストで得られる高密度メモリー(有機強誘電体)の開発、ならびに(3)超分子ポリマーの精密重合法の開発を目指し、日々研究に取り組んでいく。

### 主要メンバー

(研究員) 三苫 伸彦, HUANG Hubiao  
(訪問研究員) GOSWAMI Abir, SU Zebin  
(テクスタ) 桑山 元伸  
(研修生) CHEN Gangfeng, CHENG Yiren, HONG Yang, WU Niannian

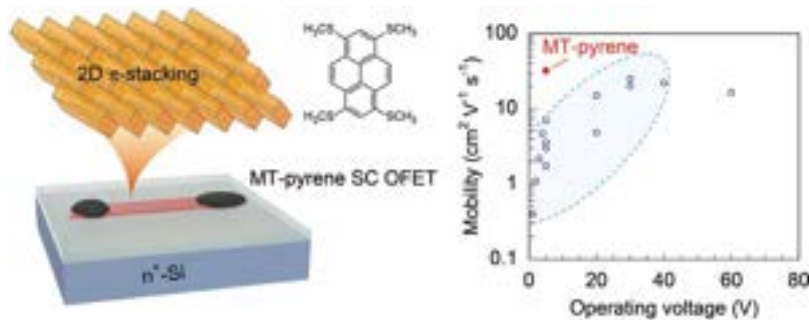
# 創発分子機能研究チーム

Emergent Molecular Function Research Team



## 有機半導体の結晶構造制御による高移動度化

有機半導体の特性は分子レベルでの電子構造だけでなく、分子集合体中での配列や配向に大きく影響を受ける。しかし、分子設計の段階で結晶構造を予測し制御することは非常に困難であり、有機半導体の結晶構造制御のための方法論や手法の開発は重要な課題である。我々は、メチルチオ基などの単純な置換基を有機半導体骨格の適切な位置に導入し分子間相互作用を制御することで、高移動化に適した結晶構造に導くことが可能であることを見出している。例えば、sandwich herringbone 型に結晶化するピレンに4個のメチルチオ基を位置選択的に導入すると、brickwork (レンガ塀) 型構造へと劇的に結晶構造が変化し、二次元的な伝導経路を形成できることを見出した。単結晶トランジスタにより電荷移動度を評価したところ、 $30 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  を超える移動度を示し、有機半導体としては最高レベルの電荷輸送能を持つことが明らかとなった。



有機半導体の結晶構造制御による高移動度化

### 主要論文

1. K. Sumitomo, Y. Sudo, K. Kanazawa, K. Kawabata, K. Takimiya, "Enantiopure 2-(2-ethylhexyl)dinaphtho [2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophenes: synthesis, single crystal structure and surprising lack of influence of stereoisomerism on thin-film structure and electronic properties", *Mater. Horiz.*, 9, 444 (2022).
2. K. Takimiya, Kirill Bulgarevich, M. Abbas, S. Horiuchi, T. Ogaki, K. Kawabata, A. Ablat, "Manipulation" of crystal structure by methylthiolation enabling ultrahigh mobility in a pyrene-based molecular semiconductor", *Adv. Mater.*, 33, 2102914 (2021).
3. K. Kawabata, K. Takimiya, "Quinoid-aromatic Resonance for Very Small Optical Energy Gaps in Small-molecule Organic Semiconductors: a Naphthodithiophenedione-oligothiophene triad system", *Chem. Eur. J.*, 27, 15660 (2021).
4. Y. Wang, K. Takimiya, "Naphthodithiophenediimide-Bithiopheneimide Copolymers for High-Performance n-Type Organic Thermoelectrics: Significant Impact of Backbone Orientation on Conductivity and Thermoelectric Performance", *Adv. Mater.*, 32, 2002060 (2020).
5. C. Wang, D. Hashizume, M. Nakano, T. Ogaki, H. Takenaka, K. Kawabata, K. Takimiya, "Disrupt and Induce" Intermolecular Interactions to Rationally Design Organic Semiconductor Crystals: from Herringbone to Rubrene-like Pitched  $\pi$ -Stack", *Chem. Sci.* 11, 1573 (2020).

瀧宮 和男 博士 (工学)・チームリーダー  
takimiya@riken.jp

### 研究分野

化学/工学/材料科学

### キーワード

有機半導体、 $\pi$ 電子系化合物、合成化学、有機電界効果トランジスタ、有機薄膜太陽電池、有機熱電材料

### 略歴

- 1994 広島大学大学院工学研究科工業化学専攻 博士課程後期修了
- 1994 広島大学工学部第三類(化学系) 助手
- 1997 デンマーク オーデンセ大学化学科 博士研究員
- 2003 広島大学大学院工学研究科物質化学システム 専攻 助教授
- 2007 同 教授
- 2010 広島大学大学院工学研究院物質化学工学部門 (応用化学) 教授
- 2012 理化学研究所 創発分子機能研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 超分子機能化学部門 創発分子機能研究グループ グループディレクター
- 2017 東北大学大学院理学研究科化学専攻 教授(現職)
- 2018 理化学研究所 創発物性科学研究センター 超分子機能化学部門 創発分子機能研究チーム チームリーダー(現職)

### グループ紹介・概要



我々は合成化学を駆使することで、新しい機能性有機電子材料(有機半導体)の開発と応用を目指している。有機半導体の特徴は、「分子構造・電子状態を自在に設計・合成できる」ことであり、電子デバイス(トランジスタ、太陽電池、熱電変換素子など)に応用可能な機能性材料を集積化することで、スイッチング、光電変換特性の高機能化が可能である。最近では、独自に開発した分子骨格の応用により、高性能低分子有機半導体の開発と高移動度有機トランジスタの実現、新規非フラーレンアクセプタ分子の開発と高性能太陽電池への展開、また、有機半導体分子の結晶構造制御法の開発によるキャリア移動度の改善などの成果を挙げている。

### 主要メンバー

(特別研究員) 澤本 尚典, KIRILL Bulgarevich  
(客員研究員) SHIN Jisoo, 川畑 公輔  
(テクスタ) 渡邊 大地  
(研修生) 堀内 信吾

# 創発生体関連ソフトマター研究チーム

Emergent Bioinspired Soft Matter Research Team



石田 康博 博士 (工学)・チームリーダー  
y-ishida@riken.jp

## 研究分野

化学／材料科学

## キーワード

自己組織化、生体模倣、ソフトマテリアル、  
刺激応答材料、環境低負荷材料

## 略 歴

- 2001 東京大学大学院工学系研究科化学生命工学専攻 博士課程修了
- 2001 同 新領域創成科学研究科先端生命科学専攻 助手
- 2002 同 工学系研究科化学生命工学専攻 助手
- 2007 同 講師
- 2007 科学技術振興機構 さきがけ研究員
- 2009 理化学研究所 複合ソフトマテリアル研究チーム チームリーダー
- 2010 同 生体模倣材料研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター  
超分子機能化学部門 創発生体関連ソフトマター研究チーム チームリーダー (現職)

## グループ紹介・概要



近年、軽量かつ柔軟で生体に優しい「ソフトマテリアル」が注目を集め、生体組織との類似性ゆえに、人工臓器の最右翼とも目されている。しかしながら、今日的人工ソフトマテリアルは、果たして本当に生体組織に似ているだろうか？ 改めて見比べると、殆どの人工ソフトマテリアルは等方的である一方、多くの生体組織は巨視的に異方的であることに気づく。筋肉・骨・神経に代表されるように、異方構造はしばしば、優れた機能の根源となる。当チームでは、磁場などの外場を利用し、高度な配向が巨大なサイズで連続した異方的ソフトマテリアルを合成するとともに、その特異な機能・物性を探求し、より生体に近づいた人工材料の開拓を目指した研究を行っている。

## 主要メンバー

- (専門技術員) 山田 邦代
- (研究員)  
SALIKOLIMI Krishnachary, WANG Xiang
- (特別研究員) SUN Zhifang
- (テクスタ) 堀本 訓子, 金井 逸人
- (研修生) WANG Shuxu

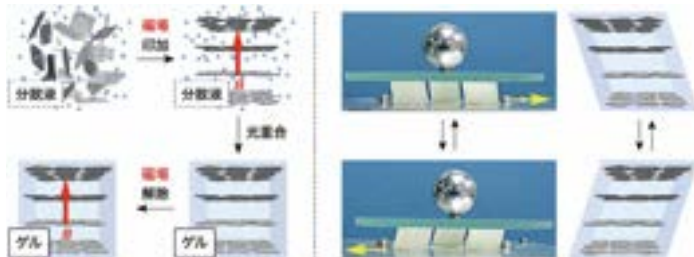
## ナノシート間の静電反発力を利用し、異方的に補強されたヒドロゲル材料

— 層に垂直方向の荷重に耐え、水平方向に変形。防振材料などへの応用に期待 —

電氣的・磁氣的な「反発力」を利用した、リニアモーターや磁気ベアリングなどの装置は、「引力」を利用するだけでは得られない特別な性能を発揮する。これに対し、ゴムやプラスチックなどの高分子材料では、構成要素間の「引力」を強めることで強度向上が図られるものの、「反発力」を利用する試みは全く行われてこなかった。一方、動物の関節軟骨は、高密度の負電荷を帯びた高分子で構成され、その静電的な「反発力」により、高い耐荷重性と低摩擦性とを両立している。

我々は、水中に分散したイオン性の酸化チタンナノシートに磁場を印加すると、全てのナノシートが磁場に対して垂直に配向し、ナノシート同士が互いに面と面を向き合わる結果、ナノシート間に巨大かつ異方的な静電反発力が現れることを見出した。この水分散液をゲル化すると、異方的な静電反発力を内包したヒドロゲル材料が得られる。この材料は、縦方向の荷重に耐えつつ、横方向には容易に変形するという、通常材料では実現しにくい特異な力学物性を示し、防振材料として優れた性能を発揮する。

今回の発見は、これまで全く省みられなかった「反発力」が、構造材料の力学物性を制御する上で極めて有用であることを実証したもので、今後の材料設計に大きな影響を与えると期待される。



異方的な静電反発力を内包したヒドロゲル

## 主要論文

1. K. Sano, X. Wang, Z. Sun, S. Aya, F. Araoka, Y. Ebina, T. Sasaki, Y. Ishida, and T. Aida, "Propagating wave in a fluid by coherent motion of 2D colloids", *Nat. Commun.*, 12, 6771 (2021).
2. K. Salikolimi, V. K. Praveen, A. A. Sudhakar, K. Yamada, N. N. Horimoto, and Y. Ishida, "Helical supramolecular polymers with rationally designed binding sites for chiral guest recognition", *Nat. Commun.*, 11, 2311 (2020).
3. Y. S. Kim, M. Liu, Y. Ishida, Y. Ebina, M. Osada, T. Sasaki, T. Hikima, M. Takata, and T. Aida, "Thermoresponsive actuation enabled by permittivity switching in an electrostatically anisotropic hydrogel", *Nat. Mater.*, 14, 1002 (2015).
4. M. Liu, Y. Ishida, Y. Ebina, T. Sasaki, T. Hikima, M. Takata, and T. Aida, "An anisotropic hydrogel with electrostatic repulsion between cofacially aligned nanosheets", *Nature*, 517, 68 (2015).

# 創発デバイス研究チーム

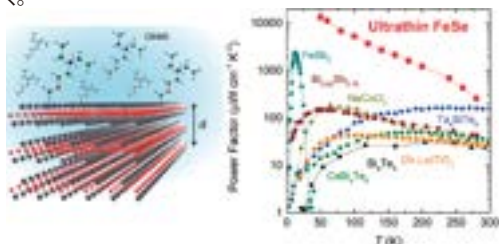
Emergent Device Research Team



## 量子物質のナノデバイスによって革新的な新物性、省・創エネルギー機能の開発をめざす

FeSe はバルクから単層まで極薄膜化すると超伝導転移温度が 8 K から 40 K (あるいは 65~100 K とも言われている) まで劇的に上昇する、極めて特異な 2 次元超伝導体である。しかしながら、試料作製の困難さから電子輸送測定の研究は非常に限られていた。本研究ではイオントロニクス手法を用いて FeSe 単層薄膜デバイスを作製して、世界で初めて熱物性の測定を行った。その結果、FeSe 単層薄膜が室温以下で従来のあらゆる物質を上回る巨大な熱電電力因子を有することを明らかにした。

左図は、当チームが開発した FeSe の電気二重層トランジスタ (EDLT) の概念図である。精密に制御された電気化学エッチングを用いて FeSe 単層デバイスを作製し、その熱電電力因子の温度依存性を初めて測定した。その結果、室温で  $250 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  という、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  など有名な熱電材料を凌駕する値を示すだけでなく、単層 FeSe が室温以下でこれまでのいかなる物質よりも大きな熱電電力因子を示すことが明らかになった (右図)。この例は量子ナノ物質が示す巨大機能のごく一端に過ぎず、今後も積極的な物質開発を続けていく。



左: イオントロニクスの技術を用いて作製された単層 FeSe デバイス  
Adapted from "Nature Communications 10, 825 (2019)."

右: 単層 FeSe の熱電電力因子の温度依存性を他の物質系と比較して示す

### 主要論文

1. T. Akamatsu, T. Ideue, L. Zhou, Y. Dong, S. Kitamura, M. Yoshii, D. Yang, M. Onga, Y. Nakagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Laurienzo, J. Huang, Z. Ye, T. Morimoto, H. Yuan, Y. Iwasa, "A van der Waals interface that creates in-plane polarization and a spontaneous photovoltaic effect", *Science*, 372, 68-72 (2021).
2. R. Miranti, D. Shin, R. D. Septianto, M. Ibáñez, M. V. Kovalenko, N. Matsushita, Y. Iwasa, S. Z. Bisri, "Exclusive Electron Transport in Core@Shell PbTe@PbS Colloidal Semiconductor Nanocrystal Assemblies", *ACS Nano*, 14, 3242-3250 (2020).
3. Y. J. Zhang, T. Ideue, M. Onga, F. Qin, R. Suzuki, A. Zak, R. Tenne, J. H. Smet, and Y. Iwasa, "Enhanced intrinsic photovoltaic effect in tungsten disulfide nanotubes", *Nature*, 570, 349-353 (2019).
4. S. Shimizu, J. Shiogai, N. Takemori, S. Sakai, H. Ikeda, R. Arita, T. Nojima, A. Tsukazaki, and Y. Iwasa, "Giant thermoelectric power factor in ultrathin FeSe superconductor", *Nat. Comm.*, 10, 825 (2019).
5. L. Liu, S. Z. Bisri, Y. Ishida, D. Hashizume, T. Aida, and Y. Iwasa, "Ligand and Solvent Effects on Hole Transport in Colloidal Quantum Dot Assemblies for Electronic Devices", *ACS Appl. Nano Mater.*, 9, 5217-5225 (2018).

岩佐 義宏 工学博士・チームリーダー  
iwasa@riken.jp

### 研究分野

物理学/工学/化学/材料科学

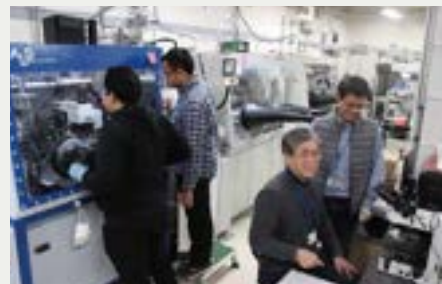
### キーワード

2次元物質、ナノチューブ、量子ドット、超伝導、熱電効果、非相反現象、異常光起電力

### 略歴

- 1986 東京大学工学部 博士課程修了
- 1986 同 助手
- 1991 同 講師
- 1994 北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科 助教授
- 2001 東北大学金属材料研究所 教授
- 2010 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授 (現職)
- 2010 理化学研究所 強相関複合材料研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 超分子機能化学部門 創発デバイス研究チーム チームリーダー (現職)

### グループ紹介・概要



2次元物質を中心とする量子物質とそのナノデバイスを用いて、量子物性機能の開拓、革新的エネルギー材料の創製に貢献することが本チームの目的である。特に、酸化物やカルコゲナイドをベースにした2次元物質、ナノチューブ、量子ドットなどの低次元物質の物性開拓を推進する。2次元物質については、ファンデルワールスヘテロ接合や電気二重層トランジスタによって、電子状態の制御、量子輸送現象などの研究を行い、量子ドット薄膜では、表面改質や溶液プロセスにより薄膜構造とその電子機能の開拓を行う。これらによって、2次元超伝導、量子相制御、非相反輸送現象の開拓、および熱電変換、光電変換、蓄電機能の増強を目指す。

### 主要メンバー

(上級研究員) BISRI Satria Zulkarnaen  
(基礎特研) 松岡 秀樹  
(特別研究員) SEPTIANTO Ricky Dwi  
(IPA) IRHAM Muhammad Alief,  
WULANDARI Retno Dwi

# 創発ソフトシステム研究チーム

Emergent Soft System Research Team



染谷 隆夫 博士 (工学)・チームリーダー  
takao.someya@riken.jp

## 研究分野

電子工学 / 材料科学

## キーワード

有機エレクトロニクス、有機電界効果トランジスタ、有機発光デバイス、有機薄膜太陽電池、有機センサ

## 略 歴

- 1997 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻 博士課程修了
- 1997 東京大学生産技術研究所 助手
- 1998 同 講師
- 2000 東京大学先端科学技術研究センター 講師
- 2001 日本学術振興会海外特別研究員(米国コロンビア大学)
- 2002 東京大学先端科学技術研究センター 助教授
- 2003 東京大学大学院工学系研究科 助教授
- 2008 同 准教授
- 2009 同 教授 (現職)
- 2015 理化学研究所 染谷薄膜素子研究室 主任研究員 (現職)
- 2015 同 創発物性科学研究センター 創発ソフトシステム研究チーム チームリーダー (現職)

## 超薄型、高効率かつ安定な有機太陽電池

柔軟性の高い太陽電池は、ウェアラブルセンサおよび電子デバイスを実現するための電源として大きな期待を集めている。こうした機能を持つ太陽電池を衣服などへ貼り付けることで、e- テキスタイルなどに搭載されたウェアラブルなセンサなどへ電力を供給するシステムが実現可能になる。

我々は、基板から封止膜までの全てを合わせた膜厚が3マイクロメートルという極薄でありながら、高いエネルギー変換効率と伸縮性、耐熱性、耐水性、大気安定性、を兼ね備えた有機太陽電池の作製に成功した。この有機太陽電池は、最大エネルギー変換効率13%を達成しながら、100℃の加熱でも素子劣化が無視できるほど小さいという高い耐熱性を持っている。また、大気環境中で120日保管後の性能劣化も5%以下に抑えられている。このような高効率と高安定性の両立により、「ホットメルト手法」を用いた衣服への直接貼り付けが可能になった。



(左) 1マイクロ厚の高分子フィルム上に製造された超柔軟有機太陽電池  
(右) 衣服上に貼り付けた超薄型有機太陽電池の洗濯写真

## 主要論文

1. M. Takakuwa, K. Fukuda, T. Yokota, D. Inoue, D. Hashizume, S. Umezumi, T. Someya, "Direct gold bonding for flexible integrated electronics", *Sci. Adv.*, 7, eabl6228 (2021).
2. J. Zhong, Z. Li, M. Takakuwa, D. Inoue, D. Hashizume, Z. Jiang, Y. Shi, L. Ou, M. O. G. Nayeem, S. Umezumi, K. Fukuda, T. Someya, "Smart Face Mask Based on an Ultrathin Pressure Sensor for Wireless Monitoring of Breath Conditions", *Adv. Mater.*, 34, 2107758 (2021).
3. Z. Jiang, F. Wang, K. Fukuda, A. Karki, W. Huang, K. Yu, T. Yokota, K. Tajima, T.-Q. Nguyen, and T. Someya, "Highly efficient organic photovoltaics with enhanced stability through the formation of doping-induced stable interfaces", *PNAS*, 117, 6391-6397 (2020).
4. S. Park, S.-W. Heo, W. Lee, D. Inoue, Z. Jiang, K. Yu, H. Jinno, D. Hashizume, M. Sekino, T. Yokota, K. Fukuda, K. Tajima, and T. Someya "Self-powered ultra-flexible electronics via nano-grating-patterned organic photovoltaics", *Nature*, 551, 516-521 (2018).
5. H. Jinno, K. Fukuda, X. Xu, S. Park, Y. Suzuki, M. Koizumi, T. Yokota, I. Osaka, K. Takimiya, and T. Someya, "Stretchable and waterproof elastomer-coated organic photovoltaics for washable electronic textile applications", *Nat. Energy*, 2, 780-785 (2017). (Selected as cover picture)

## チーム紹介・概要



エレクトロニクスは、Internet of Things (IoT)、人工知能 (AI)、ロボットなど高度に発展する情報通信技術 (ICT) の基盤を支えることが期待されている。特に、単に演算速度や記憶容量を向上するだけでなく、地球環境やそこで暮らす人類との調和を同時に実現することが求められている。我々は、有機半導体材料など新規なソフト電子材料を創発薄膜素子に応用し、超高効率かつ人間との親和性の高い創発ソフトシステムの実現を目指している。軽量性・柔らかさ・大面積性に優れる新システムによって、従来の無機半導体と相補的な特徴を生かした応用分野を切り拓く。

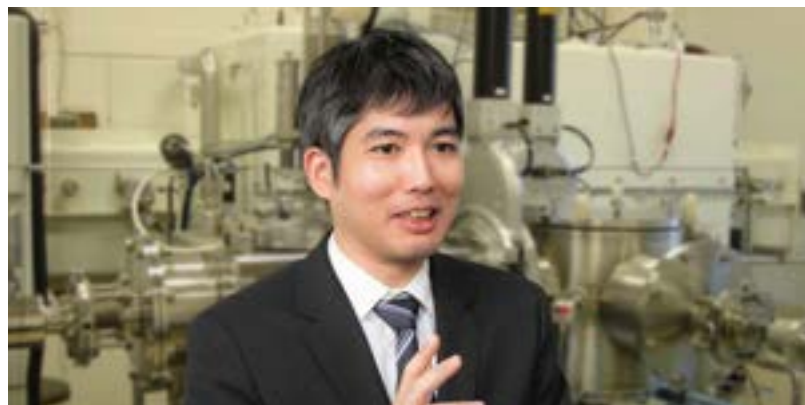
## 主要メンバー

(専任研究員) 福田 憲二郎  
(特別研究員) XIONG Sixing  
(研修生)  
高桑 聖仁, WANG Jiachen, DU Baocai,  
三宅 立馬, 片山 俊平



# 創発機能高分子研究チーム

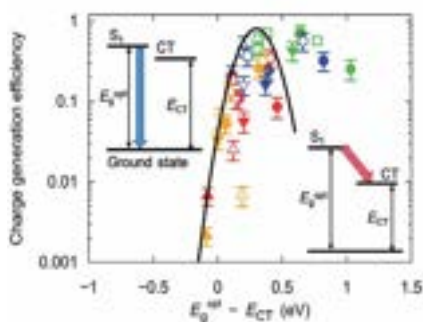
Emergent Functional Polymers Research Team



## 有機太陽電池の駆動に必要なエネルギーを解明

優れた特性を示す有機太陽電池素子を開発するためには、太陽電池に用いられる有機電子ドナーとアクセプターの2種類の材料の電子エネルギーを最適化する必要があります。しかし、そもそも太陽電池の駆動に必要な電子エネルギーの差はどのくらいなのか？という点が明らかにされておらず、最適化の明確な指針がない状態であった。

当チームで開発された手法による平面ヘテロ接合を使うことで、本質的な光電変換の素過程を研究することができた。平面ヘテロ接合界面近傍の電子エネルギーを様々な実験手法で正確に評価し、光電変換の外部量子収率と、材料の光学定数を用いた光学シミュレーションから電荷生成効率を求めた。電子ドナー材料4種類と電子アクセプター材料4種類、合計16個の素子を系統的に評価した結果、分子の励起状態と界面での電荷移動状態の間に0.2～0.3 eVのエネルギー差があれば、光を電流に効率的に変換できることを見いだした。一方で、これまで重要と考えられてきた電荷移動状態と自由電荷状態のエネルギー差は、電荷生成効率との明確な相関が見られなかった。この結果は、これまでの有機半導体開発の指針に修正を迫るものである。



平面ヘテロ接合界面の電子状態間のエネルギー差と電荷生成効率の相関

### 主要論文

1. K. Nakano, K. Terado, Y. Kaji, H. Yoshida H., K. Tajima, "Reduction of Electric Current Loss by Aggregation-Induced Molecular Alignment of a Non-Fullerene Acceptor in Organic Photovoltaics", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13, 60299 (2021).
2. F. Wang, K. Nakano, H. Segawa, K. Tajima, "Inversion of Circular Dichroism Signals in Chiral Polythiophene Films Induced by End-On-Oriented Surface-Segregated Monolayers", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13, 7510 (2021).
3. C. Wang, H. Hao, D. Hashizume, K. Tajima, "Surface-induced Enantiomorphic Crystallization of Achiral Fullerene Derivatives in Thin Films", *Chem. Sci.*, 11, 4702 (2020).
4. W.-C. Wang, S.-Y. Chen, Y.-W. Yang, C.-S. Hsu, and K. Tajima, "Face-on Reorientation of  $\pi$ -Conjugated Polymers in Thin Films by Surface-Segregated Monolayers", *J. Mater. Chem. A*, 4, 2070013 (2020).
5. K. Nakano, Y. Chen, B. Xiao, W. Han, J. Huang, H. Yoshida, E.J. Zhou, and K. Tajima, "Anatomy of the Energetic Driving Force for Charge Generation in Organic Solar Cells", *Nature Commun.*, 10, 2520 (2019).

但馬 敬介 博士 (工学)・チームリーダー  
keisuke.tajima@riken.jp

### 研究分野

化学/工学/材料科学

### キーワード

有機エレクトロニクス、有機薄膜太陽電池、高分子合成、自己組織化、ナノ構造制御

### 略歴

- 2002 東京大学大学院工学系研究科化学生命工学専攻 博士課程修了
- 2002 ノースウエスタン大学 博士研究員
- 2004 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻 助手
- 2009 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻 講師
- 2011 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻 准教授
- 2011 独立行政法人科学技術振興機構 さきがけ研究者 (-2017)
- 2012 理化学研究所 創発機能高分子研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 超分子機能化学部門 創発機能高分子研究チーム チームリーダー (現職)

### チーム紹介・概要



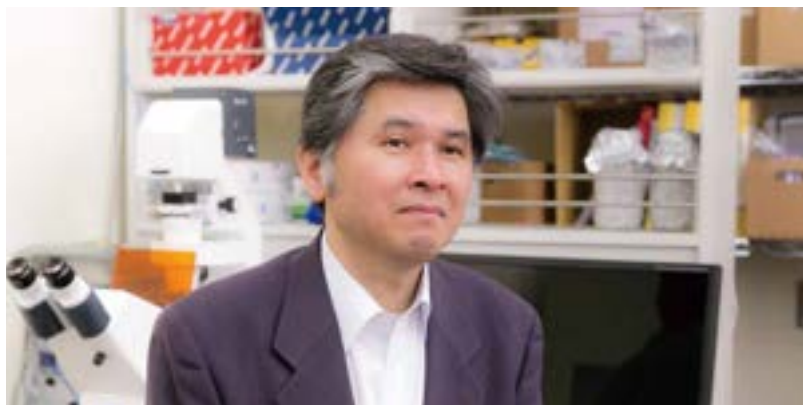
当チームでは、新規な有機半導体高分子材料の開発と、それらの有機電子デバイスへの応用に取り組んでいる。特に、薄膜形成時における分子間の相溶性や相互作用を考慮した精密な有機半導体分子設計により、これまで基礎化学の範疇であった分子自己組織化を優れた機能に結びつけることを狙い、高分子薄膜中の分子レベル・ナノレベルの構造を自在に制御する手法を探求している。その結果として得られる、これまでにないレベルでの構造制御によって、電子デバイス性能を飛躍的に向上させるためのブレークスルーを探求している。ターゲットとしては、薄膜太陽電池や電界効果トランジスタなどの既存の有機電子デバイスに加えて、新規な機能を持ったデバイスの開発にも取り組んでいる。

### 主要メンバー

- (研究員) 中野 恭兵
- (基礎特研) 王 超 (WANG Chao), 齋藤 仁志
- (特別研究員) 落合 優登, 横山 高穂
- (テクスタ) 加地 由美子
- (IPA) 王 威智 (WANG Wei-Chih)
- (研修生) 鈴木 遼

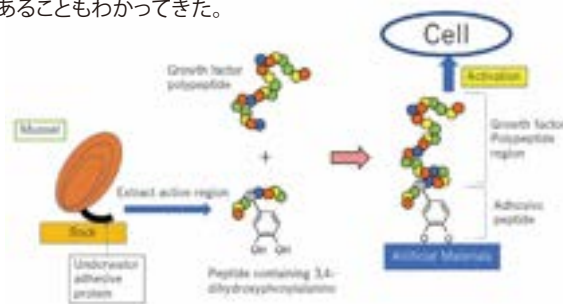
## 創発生体工学材料研究チーム

Emergent Bioengineering Materials Research Team



## 生体機能に触発された水中接着性高分子による生物活性材料

現代医療では、金属、セラミクスから高分子まで、さまざまな材料が、体内で人工臓器としてあるいは医療機器の一部として、体内外で生体成分と接触して用いられている。これら医療用材料として選ばれる素材は生体適合性を考慮して選ばれているが、必ずしも生体との接着性や生着性は十分ではなく、材料表面の処理によってこれらの性質を高める手法が研究されている。本チームでは、生体材料の生体親和性を向上させる手法として、生理活性を持つタンパク質（ポリペプチド）を材料表面に固定する手法を開発している。例えば、ムラサキガイなどの貝類が岩場に接着する際に分泌する接着性タンパク質の活性部位に含まれる3,4-ジヒドロキシフェニルアラニン、成長因子タンパク質配列に、遺伝子組換え技術と酵素法、固相合成法などを複合したバイオ直交化学アプローチで導入した。すると、チタンやヒドロキシアパタイトのような無機材料表面にも高分子の有機材料表面にも固定化できるようになり、生体との親和性が向上した。細胞表面の受容体を直接、長期間に亘り活性化できるため、溶解状態のタンパク質より高い活性があることもわかってきた。



生理活性タンパク質への水中接着タンパク質の活性部位を  
バイオ直交化学導入し生理活性材料表面創成

## 主要論文

- H. Kashiwagi, N. Morishima, S. Obuse, T. Isoshima, J. Akimoto, and Y. Ito, "SARS-CoV-2 proteins microarray by photoimmobilization for serodiagnosis of the antibodies", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 94, 2435 (2021).
- S. Tada, X. Ren, H. Mao, Y. Heo, S.-H. Park, T. Isoshima, L. Zhu, X. Zhou, R. Ito, S. Kurata, M. Osaki, E. Kobatake, and Y. Ito, "Versatile mitogenic and differentiation-inducible layer formation by underwater adhesive polypeptides", *Adv. Sci.*, 2100961 (2021).
- R. Wang, Y. Tian, J. Wang, W. Song, Y. Cong, X. Wei, Y. Mei, H. Miyatake, Y. Ito, and Y. Chen, "Biomimetic Glucose Trigger-Insulin Release System Based on Hydrogel Loading Bidentate  $\beta$ -Cyclodextrin", *Adv. Funct. Mater.*, 20, 2104488 (2021).
- A. Nandakumar, Y. Ito, and M. Ueda, "Solvent Effects on the Self-Assembly of an Amphiphilic Polypeptide Incorporating  $\alpha$ -Helical Hydrophobic Blocks", *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 20994 (2020).
- S. J. Park, J. Akimoto, N. Sakakibara, E. Kobatake, and Y. Ito, "Thermally induced switch of coupling reaction using morphological change of thermoresponsive polymer on reactive hetero-armed nanoparticle", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 12, 49165 (2020).

伊藤 嘉浩 工学博士・チームリーダー  
y-ito@riken.jp

## 研究分野

材料科学／生体工学／有機化学

## キーワード

エネルギー変換、センサー、精密高分子合成、進化分子工学、ナノバイオテクノロジー

## 略 歴

- 1987 京都大学大学院工学研究科 博士学位取得
- 1988 京都大学工学部 助手
- 1996 同 助教授
- 1997 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 助教授
- 1999 徳島大学工学部 教授
- 2002 神奈川科学技術アカデミー プロジェクトリーダー
- 2004 理化学研究所 伊藤ナノ医工学研究室 主任研究員（現職）
- 2013 同 創発物性科学研究センター 超分子機能化学部門 創発生体工学材料研究チーム チームリーダー（現職）

## チーム紹介・概要



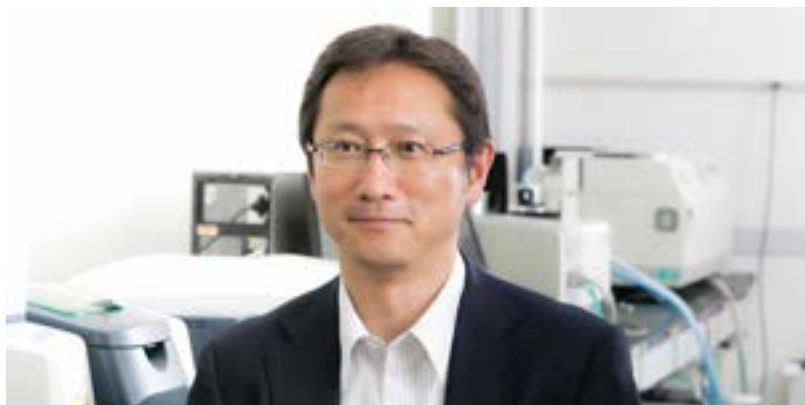
人工素子・材料と、生体成分からなる素子とを様々な複合化して環境調和型超高効率エネルギー収集・変換のための創発材料の研究を行う。有機合成化学、高分子化学、バイオテクノロジーなどを複合化し、さらに融合させた新しい精密高分子合成技術を生み出し、それにより新しい生体素子と人工素子の複合化を行い、それらの界面の研究を介して超高効率エネルギー変換デバイスを実現することを目指す。特に、機能性モノマーを含むランダム配列の高分子ライブラリーから、特定の機能をもつ新しい高分子を選別し、生み出す化学拡張進化分子工学の手法を「創発化学」として確立し、その応用展開を目指す。

## 主要メンバー

- (専任研究員) 川本 益揮, 鶴澤 尊規, 上田 一樹
- (客員主管研究員) 阿部 洋
- (客員研究員) 萩原 恭二, 秋元 淳
- (IPA) ELREFAEY Ahmed Emad Abdelmoneam Ali, METAWEA Ramadan Mohamed Mohamed Osama
- (JRA) OTHMAN Hassan Mahmoud Mahmoud, HU Mingxin
- (テクスタ) 皆川 倫子, 高久 英明
- (研修生) 孫 健

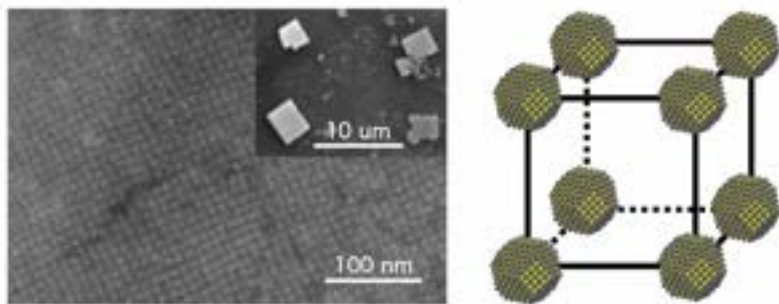
# 創発超分子材料研究チーム

Emergent Supramolecular Materials Research Team



## 単純立方格子状に自己集合する コロイド半導体量子ドット

コロイド半導体量子ドット(半導体ナノ結晶)は、LED、太陽電池、トランジスタ、センサー、バイオイメージング、単一光子発生源、光触媒など、多岐にわたる応用が期待されている。球形のコロイド量子ドットは、面心立方格子または体心立方格子状に充填される。しかし、単純立方格子では空間充填率(結晶内で粒子が占めている体積分率)が低い。そのため、集合による粒子あたりのエネルギー利得が少ないことから、そのような量子ドット超結晶の作製は困難であった。我々はゲル浸透クロマトグラフィー(GPC)法を用いて、硫化鉛(PbS)コロイド量子ドットにおいて連続的かつ選択的に配位子を一部除去した後、量子ドット超結晶を作製した。その超結晶では隣接するコロイド量子ドット同士が融合・接触することなく、単純立方格子状での3次元自己集合を実現した。単純立方格子では、他の充填様式とは異なる特異的な光・電子物性の発現が期待されており、その解明を進めている。



PbS コロイド量子ドットが単純立方格子状に集合した超結晶、その超結晶表面の電子顕微鏡像、充填様式図

### 主要論文

1. J. Liu, K. Enomoto, K. Takeda, D. Inoue, Y.-J. Pu, "Simple Cubic Self-Assembly of PbS Quantum Dots by Finely Controlled Ligand Removal through Gel Permeation Chromatography", *Chem. Sci.*, 12, 10354 (2021).
2. T. Lee, K. Enomoto, K. Ohshiro, D. Inoue, T. Kikitsu, H.-D. Kim, Y.-J. Pu, D. Kim, "Controlling the Dimension of the Quantum Resonance in CdTe Quantum Dot Superlattices Fabricated via Layer-by-Layer Assembly", *Nat. Commun.*, 11, 5471 (2020).
3. N. Aizawa, Y. Harabuchi, S. Maeda, Y.-J. Pu, "Kinetic Prediction of Reverse Intersystem Crossing in Organic Donor-Acceptor Molecules", *Nat. Commun.*, 11, 3909 (2020).
4. K. Enomoto, D. Inoue, Y.-J. Pu, "Controllable 1D patterned assembly of colloidal quantum dots on PbSO<sub>4</sub> nanoribbons", *Adv. Funct. Mater.*, 29, 1905175 (2019).
5. Y.-J. Pu, Y. Koyama, D. Otsuki, M. Kim, H. Chubachi, Y. Seino, K. Enomoto, N. Aizawa, "Exciplex Emissions Derived from Exceptionally Long-Distanced Donor and Acceptor Molecules", *Chem. Sci.*, 10, 9203 (2019).

夫 勇進 博士(工学)・チームリーダー

yongjin.pu@riken.jp

### 研究分野

化学/材料科学

### キーワード

励起状態、状態間遷移、有機半導体、半導体ナノ粒子、コロイド量子ドット

### 略歴

- 2002 早稲田大学大学院理工学研究科応用化学専攻博士課程修了
- 2002 早稲田大学理工学部応用化学科 助手
- 2003 早稲田大学大学院理工学研究科 21COE 客員研究助手
- 2004 日本学術振興会 海外特別研究員(オックスフォード大学)
- 2006 山形大学工学部機能高分子工学科 助手
- 2007 山形大学大学院理工学研究科有機デバイス工学専攻 助教
- 2010 同 准教授
- 2013 科学技術振興機構 さきがけ研究員
- 2016 山形大学大学院有機材料システム研究科 有機材料システム専攻 准教授
- 2017 理化学研究所 創発物性科学研究センター 超分子機能化学部門 創発超分子材料研究チーム チームリーダー(現職)

### チーム紹介・概要



有機半導体分子、無機半導体微粒子において、(動的/静的)構造・組成・集合状態の制御により、励起状態に関わる、エネルギー準位/状態間遷移速度/発光効率/スピン多重度等の任意制御を実現し、新しいエネルギー関連技術の創出に挑戦している。

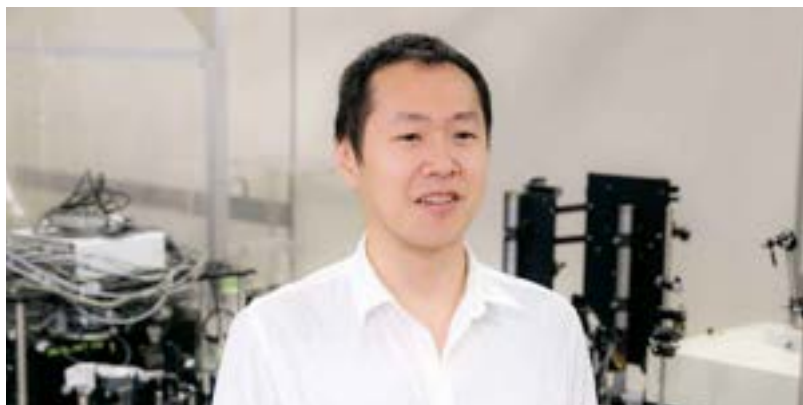
### 主要メンバー

(特別研究員)

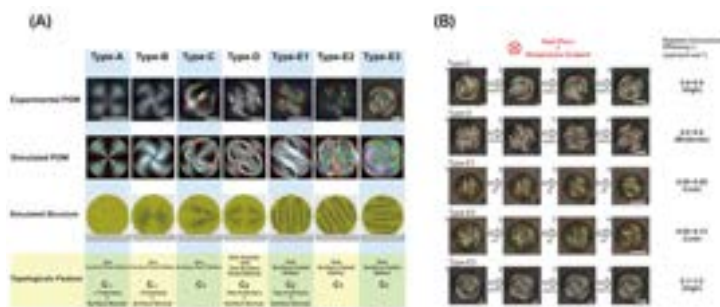
KIM Minjun, LIU Jianjun, MIRANTI Rento

## ソフトマター物性研究チーム

Physicochemical Soft Matter Research Team

キラルネマチック液晶エマルジョンにおける  
トポロジー依存・高効率レーマン回転の発見

キラルな液晶に熱勾配を印加すると、キラリティに対応した一方向に液晶が流動回転する現象が見られる。古くドイツの科学者レーマンにより見出された「レーマン回転」と呼ばれるこの現象については、発見からおよそ 100 年が経つにもかかわらず、完全な理解には至っていない。一方で、液晶におけるトポロジーは連続体における普遍的な特異（欠陥）点の性質として古くから知られており、各種複雑系の典型的な物理モデルとして基本的理解を行う上で重要であると考えられてきている。本研究で我々は、キラル液晶をフッ素溶媒中に分散させたエマルジョンでレーマン回転を発生させることに成功した。エマルジョン中に形成される液滴はトポロジー多様性を示し、その大きさやキラリティの強さによって異なるトポロジー状態に分別できる。本研究で実現されたレーマン回転では、こうしたトポロジー状態に熱-運動変換効率が依存する。この結果は、長年物理学者達を悩ませてきたレーマン回転そのものの理解に繋がるだけでなく、トポロジーの介在する物理現象として基礎科学的に興味深いものである。



(A) キラル液晶エマルジョンのトポロジカル多様性、  
(B) トポロジーに依存したレーマン回転の様子

## 主要論文

1. H. Nishikawa, K. Sano and F. Araoka, "Anisotropic fluid with phototunable dielectric permittivity", *Nat. Commun.*, 13, 1142 (2022).
2. H. Nishikawa and F. Araoka, "A New Class of Chiral Nematic Phase with Helical Polar Order", *Adv. Mater.*, 33, 2101305 (2021).
3. S. Aya and F. Araoka, "Kinetics of motile solitons in nematic liquid crystals", *Nat. Commun.*, 11, 3248 (2020).
4. J. Yoshioka and F. Araoka, "Topology-dependent self-structure mediation and efficient energy conversion in heat-flux-driven rotors of cholesteric droplets", *Nat. Commun.*, 9, 432 (2018).
5. K. V. Le, H. Takezoe, and F. Araoka, "Chiral Superstructure Mesophases of Achiral Bent-Shaped Molecules - Hierarchical Chirality Amplification and Physical Properties", *Adv. Mater.*, 29, 1602737 (2017).

荒岡 史人 博士 (工学)・チームリーダー  
fumito.araoka@riken.jp

## 研究分野

有機材料機能物性

## キーワード

液晶・高分子、ソフトマター物性測定、光物性、有機非線形光学、有機強誘電体

## 略 歴

- 2003 東京工業大学 大学院理工学研究科 有機・高分子物質専攻 博士課程修了
- 2003 ベルギー・ルーバンカトリック大学 博士研究員
- 2005 東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 博士研究員
- 2006 東京工業大学大学院理工学研究科 有機・高分子物質専攻 博士研究員
- 2007 同 助教
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム/ソフトマター物性研究ユニット ユニットリーダー
- 2018 理化学研究所 創発物性科学研究センター ソフトマター物性研究チーム チームリーダー (現職)

## ユニット紹介・概要



当チームでは、高分子材料や液晶をはじめとしたソフトマターのメソスコピックスケールにおける構造多様性に由来する物理・物性とその操作、そして光・電子デバイスや化学機能材料へと発展させるための研究を行っている。こうした構造多様性の本質は分子や分子集合体の自己組織化性にあるが、液晶のように程よい流動性を併せ持っている場合には、電場や磁場、光などの外場印加、あるいは界面の修飾などによりポテンシャル曲面を変化させることで、比較的容易に多様構造の選択・操作が可能となり、これにより極性構造やキラリティ、誘電周期構造といった、オプトロニクスを中心とした応用へ繋がる機能マテリアルを得ることができる。我々は、こうした構造・物性制御に加え、非線形光学測定・イメージングなどを得意とし、主な解析ツールとしている。

具体的には、1.新規液晶性強誘電体における物理機構解明とデバイス創製、2.自己組織化による巨視的キラリティ発現のメカニズム、コントロールと応用、3.カラムナー液晶の自己組織化性を切り口とした光・電子デバイスにおける物理機構の探索、などを行っている。

## 主要メンバー

(基礎特研) 西川 浩矢  
(特別研究員)

野間 大史, 岡田 大地, ALI Muhammad

# 物質評価支援チーム

Materials Characterization Support Team



橋爪 大輔 博士 (理学)・チームリーダー  
hashi@riken.jp

## 研究分野

構造化学／分析化学／材料科学

## キーワード

X線結晶構造解析、電子顕微鏡、化学分析

## 略歴

- 1997 東京工業大学 理工学研究科 化学専攻 博士課程修了 博士 (理学) 取得
- 1997 電気通信大学 電気通信学部 電子物性工学科 助手
- 2002 理化学研究所 先端技術開発支援センター 物質構造解析チーム 研究員
- 2011 同 先端技術基盤部門 物質評価チーム 専任研究員
- 2013 同 創発物性科学研究センター 超分子機能化学部門 物質評価支援ユニット ユニットリーダー
- 2018 同 超分子機能化学部門 物質評価支援チーム チームリーダー (現職)

## チーム紹介・概要



当チームでは、X線結晶構造解析、電子顕微鏡観察、化学分析を柱とした研究支援を行っている。我々はルーチンの技術支援に留まるのではなく、測定技術に磨きをかけ、専門とする手法で質的に最高レベルの解析、観察、分析を行うことを目指している。研究者と緊密に連携し、研究者の研究目的を踏まえた分析と結果評価を行い、研究をバックアップし、さらに研究に新しい視点を加えるよう研究支援を行っている。分析を通じて先端的研究を支えるために、研究の動向を見据えた未踏の測定および解析技術の開発に取り組んでいる。さらに当チームが得意とする手法を有機的に結合させることで、複眼的な研究支援を行うことを目指している。

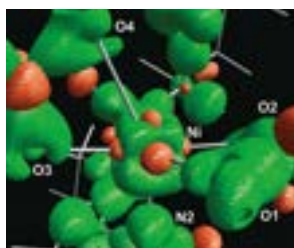
## 主要メンバー

(専任技師) 鈴木 恵子  
(専門技術員) 井ノ上 大嗣  
(テクスタ) 喜々津 智郁, 足立 精宏

## 精密X線解析で観測する化学結合

当チームでは、高精度・高確度な単結晶 X 線回折実験と解析により価電子の分布を精度よく観測し、新奇な結合を有する分子や、不安定化学種を中心に、その性質を実験的に明らかにしている。

X線結晶構造解析は結晶中の全電子密度分布を、球状原子モデル (孤立原子モデル) を当てはめて近似することで、結晶中での原子の配列を得る手法である。これによって得られる分子の構造が、化合物の性質について重要な情報を与える。このため単結晶 X 線構造解析は、化学研究において欠くことのできない研究手法の一つとなっている。一方、分子の化学的性質に大きく寄与しているのは、価電子の分布である。分子の性質、特に新奇な結合や、反応性、電荷分離、結合状態、分子間相互作用の評価には価電子の分布を考慮する必要がある。しかし、通常の X 線結晶構造解析では、価電子は構造モデルに取込まれないため、これらの定量的な評価を行うことができない。我々は球状原子モデルの代わりに多極子モデルを用いる手法で価電子の分布を解析し、新奇な結合、ラジカルの分布、結合開裂過程など、化合物の結合状態を中心に分子の性質を明らかにしている。



電子密度分布解析によって観測された Ni 錯体の 3d 電子と結合電子の分布  
Licensed under CC BY 4.0.

## 主要論文

- A. Li, S. Kong, C. Guo, H. Ooka, K. Adachi, D. Hashizume, Q. Jiang, H. Han, J. Xiao, and R. Nakamura, "Enhancing the stability of cobalt spinel oxide towards sustainable oxygen evolution in acid", *Nat. Catal.*, 5, 109 (2022).
- T. Kubo, Y. Suga, D. Hashizume, H. Suzuki, T. Miyamoto, H. Okamoto, R. Kishi, and M. Nakano, "Long carbon-carbon bonding beyond 2 Å in tris(9-fluorenylidene)methane", *J. Am. Chem. Soc.*, 143, 14360 (2021).
- T. Kajitani, K. Motokawa, A. Kosaka, Y. Shoji, R. Haruki, D. Hashizume, T. Hikima, M. Takata, K. Yazawa, K. Morishima, M. Shibayama, and T. Fukushima, "Chiral crystal-like droplets displaying unidirectional rotating sliding", *Nat. Mater.*, 18, 266 (2019).
- S. Park, S. W. Heo, W. Lee, D. Inoue, Z. Jiang, K. Yu, H. Jinno, D. Hashizume, M. Sekino, T. Yokota, K. Fukuda, K. Tajima, and T. Someya, "Self-powered ultra-flexible electronics via nano-grating-patterned organic photovoltaics", *Nature*, 561, 516 (2018).
- Y. Sohtome, G. Nakamura, A. Muranaka, D. Hashizume, S. Lectard, T. Tsuchimoto, M. Uchiyama, and M. Sodeoka, "Naked d-orbital in a centrochiral Ni(II) complex as a catalyst for asymmetric [3+2] cycloaddition", *Nat. Commun.*, 8, 14875 (2017).

# 量子機能システム研究グループ

Quantum Functional System Research Group



樽茶 清悟 工学博士・グループディレクター  
tarucha@riken.jp

## 研究分野

物理学／工学

## キーワード

量子計算、量子ビット、スピン制御、量子ドット、トポロジカル粒子

## 略 歴

- 1978 日本電信電話公社(武蔵野電気通信研究所基礎研究部)(現NTT基礎研究所)入社
- 1986 マックスプランク固体研究所(独) 客員研究員
- 1990 基礎研究所研究グループリーダー
- 1995 デルフト工科大学(蘭) 客員教授
- 1998 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授
- 2004 同 工学系研究科物理工学専攻 教授(現職)
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子機能システム研究グループ グループディレクター(現職)
- 2018 同 創発物性科学研究センター 副センター長(現職)
- 2019 東京理科大学大学院理学研究科物理学専攻 客員教授(現職)
- 2020 理化学研究所 創発物性科学研究センター 半導体量子情報デバイス研究チーム チームリーダー(現職)

## グループ紹介・概要



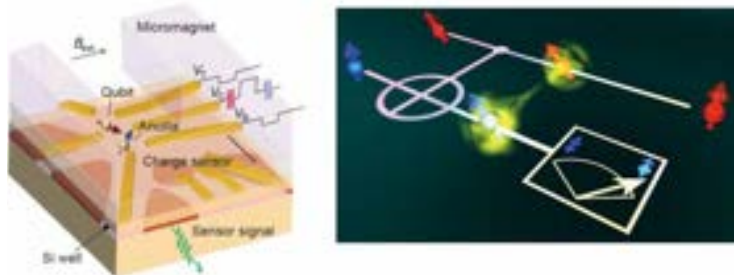
固体中の量子状態の制御を原理とする量子情報処理の物理と技術との研究を行なっている。量子情報処理は、エネルギー損失を抑え、安全性を確保できる理想的な情報技術である。我々は、その有効性を半導体中のスピンの量子コヒーレンスと量子もつれの操作、トポロジカル操作、光-スピン変換などの概念に基づいて検証し、新原理、新技術による革新的な応用の道筋を付けることを目指す。具体的には、シリコンのスピンの小規模量子情報処理回路の構築と同回路中での量子コヒーレンスや量子もつれの制御法の開発、革新的な量子情報デバイスの開発、そして新原理の量子情報を提供する、トポロジカル粒子制御法の物理と技術の探求を課題とする。

## 半導体量子ビットの量子非破壊測定

シリコン中の単一電子スピンを用いた量子コンピュータは、半導体プロセス技術による大規模化が期待されることから活発に研究されている。しかし、通常スピンを読み出す際に状態が破壊されるため、誤り訂正をはじめとする、有用な測定ベースのプロトコルの実行が困難であった。我々は、イジング型相互作用を利用して隣接電子に情報を転写、測定することにより、量子非破壊測定に初めて成功した。

実験では、まず、スピン共鳴を利用して電子スピンの任意の量子ビット状態(主ビット)を作る。次に、主ビットを補助ビットと一定時間結合させることにより、両者の間に量子力学的なもつれ相関を作る。その後、補助ビットを測定すると、主ビットの状態を直接測定することなく判定できる。これは、測定行為によって主ビットに誤りを起こすことがない量子射影測定である(量子非破壊測定)。この原理を使うと、補助ビットの繰り返し測定によって、主ビットの測定精度を大きく上げられる。

本成果は、量子誤り訂正回路の具体的な実装法を示すもので、半導体量子コンピュータの大規模化の原理的ブレークスルーになるものと期待される。



図(左) 実験に用いた二重量子ドット試料の模式図。(右) 量子非破壊測定の概念図。

## 主要論文

1. A. Noiri, K. Takeda, T. Nakajima, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, and S. Tarucha, "Fast universal quantum gate above the fault-tolerance threshold in silicon", *Nature* 601, 338 (2022).
2. T. Nakajima, A. Noiri, K. Kawasaki, J. Yoneda, P. Stano, S. Amaha, T. Otsuka, K. Takeda, M.R. Delbecq, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, D. Loss, and S. Tarucha, "Coherence of a driven electron spin qubit actively decoupled from quasi-static noise", *Phys. Rev. X* 10, 011060 (2020).
3. J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, S. Li, J. Kamioka, T. Kodera, and S. Tarucha, "Quantum non-demolition readout of an electron spin in silicon", *Nature Commun.* 11, 1144 (2020).
4. T. Fujita, K. Morimoto, H. Kiyama, G. Allison, M. Larsson, A. Ludwig, S.R. Valentin, A.D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, "Angular momentum transfer from photon polarization to an electron spin in a gate-defined quantum dot", *Nature Commun.* 10, 2991 (2019).
5. K. Ueda, S. Matsuo, H. Kamata, S. Baba, Y. Sato, Y. Takeshige, K. Li, S. Jeppesen, L. Samuelson, HQ Xu, and S. Tarucha, "Dominant nonlocal superconducting proximity effect due to electron-electron interaction in a ballistic double nanowire", *Science Adv.* 5, eaaw2194 (2019).

## 主要メンバー

- (研究員) 中島 峻, 武田 健太  
 (特別研究員) CAMENZIND Leon,  
 DEL VALLE INCLAN REDONDO Yago Baltasar  
 (基礎特研) 野入 亮人, 松尾 貞茂  
 (客員研究員) 大塚 朋廣, 溝口 来成,  
 FRASER Michael Desmond  
 (テクスタ I) LIU Xin  
 (リサーチアソシエイト) 佐藤 洋介  
 (研修生) 武重 有祐, 井本 隆哉, 山田 季弥,  
 田所 雅大, 松岡 竜太郎, 小林 昌平

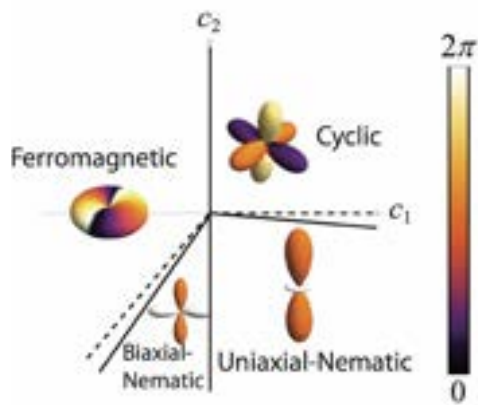
# 量子凝縮体研究チーム

Quantum Condensate Research Team



## ボース・アインシュタイン凝縮体におけるトポロジカル励起の研究

冷却原子気体は相互作用の強さと符号をはじめとする、系を特徴づけるほとんどすべてのパラメータを高い精度で制御できる理想的な人工量子物質である。我々はこの高い制御性を用いて、冷却原子気体、とりわけ、そのボース・アインシュタイン凝縮体におけるトポロジカル励起の研究を行ってきた。系を特徴づけるパラメータを突然変化させると、秩序変数が断熱的に応答することができず、量子渦やスピン渦のようなトポロジカル励起がいわゆるキブル・ズーレック機構によって発生する。また、光格子に閉じ込められた反強磁性的な相互作用をするボース・アインシュタイン凝縮体に外部磁場を印可することによってノットと呼ばれる興味深いトポロジカル励起が発生することを見出した。



スピン2 ボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態の相図  
どの相に属するかによって、異なったタイプのトポロジカル励起が生じる

### 主要論文

1. E. Yukawa and M. Ueda, "Morphological Superfluid in a Nonmagnetic Spin-2 Bose-Einstein Condensate", *Phys. Rev. Lett.*, 124, 105301 (2020).
2. N. Kura and M. Ueda, "Standard Quantum Limit and Heisenberg Limit in Function Estimation", *Phys. Rev. Lett.*, 124, 010507 (2020).
3. K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda and M. Sato, "Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics", *Phys. Rev. X*, 9, 041015 (2019).
4. K. Kawabata, S. Higashikawa, Z. Gong, Y. Ashida, and M. Ueda, "Topological unification of time-reversal and particle-hole symmetries in non-Hermitian physics", *Nat. Commun.*, 10, 297 (2019). [selected as Editors' Highlights]
5. Z. Gong, Y. Ashida, K. Kawabata, K. Takasan, S. Higashikawa, and M. Ueda, "Topological Phases of Non-Hermitian Systems", *Phys. Rev. X*, 8, 031079 (2018). [Miguel A. Bandres and Mordechai Segev, *Physics* vol.11, 96 (2018) に Viewpoint が掲載]

上田 正仁 理学博士・チームリーダー  
masahito.ueda@riken.jp

### 研究分野

物理学／工学／数学／学際研究

### キーワード

冷却原子、ボース・アインシュタイン凝縮、光格子、量子シミュレーション、量子相関、説明可能なAI

### 略歴

- 1988 日本電信電話株式会社基礎研究所 研究員
- 1994 広島大学工学部第二类電子物性大講座 助教授
- 2000 東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻 教授
- 2008 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授 (現職)
- 2014 理化学研究所創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 量子凝縮体研究チーム チームリーダー (現職)

### チーム紹介・概要



量子、測定、情報、熱力学の境界領域において物理学のフロンティアを開拓することを目指している。特に、冷却原子気体を研究の舞台として、他の系では実現が困難な物理現象の探究を行う。また、物理学の原理に基づいて説明可能なAIの構築を目指す。

### 主要メンバー

- (研究員) 森 貴司
- (特別研究員) DABELOW Lennart Justin

# 創発現象観測技術研究チーム

Emergent Phenomena Observation Technology Research Team



**進藤 大輔** 工学博士・チームリーダー  
daisuke.shindo@riken.jp

## 研究分野

物理学／工学／材料科学

## キーワード

イメージング、電子顕微鏡、ローレンツ顕微鏡法、磁束量子、電子線ホログラフィー、ナノ磁性

## 略 歴

- 1982 東北大学大学院工学研究科 博士課程修了
- 1982 東北大学金属材料研究所 助手
- 1992 東北大学素材工学研究所 助教授
- 1994 東北大学多元物質科学研究所 教授
- 2010 理化学研究所 量子現象観測技術研究チーム 客員研究員
- 2012 同 創発現象観測技術研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 創発現象観測技術研究チーム チームリーダー (現職)
- 2019 東北大学 名誉教授 (現職)

## チーム紹介・概要



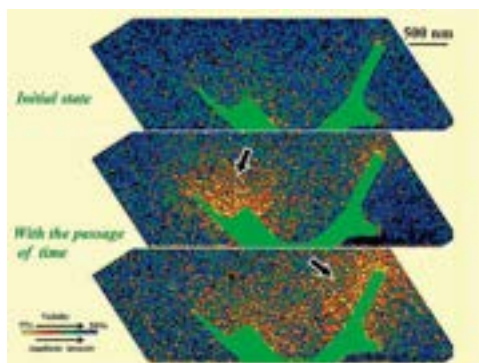
当チームでは、創発現象の観測と解析を目的に、先端電子顕微鏡法、特に電子線ホログラフィーにより試料内外の電磁場の解析を行っている。電子線ホログラフィーは電子の波動性に注目し、その干渉効果を利用して電磁場をナノスケールで可視化できる最先端の計測技術である。電磁場のその場観察を実現するため、複数の探針を装着した多機能の試料ホルダを開発し、電圧や磁場を試料に印加した際の試料内外の電磁場の変化を追跡し、その電氣的・磁氣的特性との対応も明らかにしている。これらの観測技術の高分解能化と高精度化を図りつつ、新規に見出された多粒子系・多自由度系物質における創発現象の機構解明を推進している。

## 主要メンバー

- (上級研究員) 原田 研
- (技師) 岩崎 洋
- (テクスタ) 鳥田 恵子

## 電子の蓄積とその集団運動のその場観察

材料の電磁気特性を理解するためには、その内外に分布する電磁場を解析することが必要である。さらに電磁場は、多様な電子の振る舞いを起源としており、その可視化は電磁気特性を体系的に理解する上で不可欠である。電磁場による入射電子の位相変化を検出できる電子線ホログラフィーを用いて、我々は複雑な形態を持つ生物試料をはじめ、各種の絶縁体の帯電効果を利用することで試料近傍での、2次電子の集団運動の可視化に成功している。図はネズミの坐骨神経の微細線維(緑)周辺で観察された振幅再生像の例である。左下のカラースケールが示すように、電子の動きによる電場の乱れた領域が明黄色(干渉縞の visibility と振幅再生像のコントラストの低下に対応)で表示されている。上図の電子線照射初期では、電場の乱れに対応する領域は目立たないのに対し、電子線照射を継続する(下図2枚)と電場の乱れが増大し時間とともにその分布が変化する様子が捉えられている。一連の観察結果は、一旦試料から放出された2次電子が、電子線照射時間の増大とともに次第に強く帯電した絶縁体試料に引き付けられ、枝に囲まれた領域に徐々に蓄積し、集団的に移動している様子を示している。



ネズミの坐骨神経の微細線維(緑)周辺の振幅再生像。時間経過と共に電子の動きに伴う電場の乱れが生じた明黄色部が、枝に囲まれた領域内の矢印の部分に明瞭に観察される。

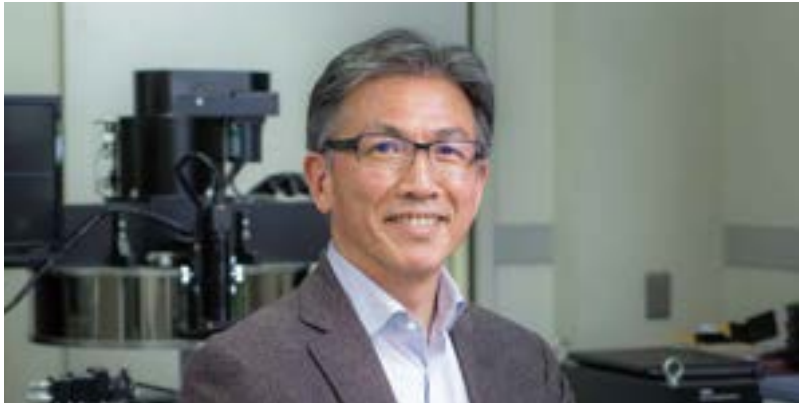
## 主要論文

1. K. Niitsu, Y. Liu, A. C. Booth, X. Yu, N. Mathur, M. J. Stolt, D. Shindo, S. Jin, J. Zang, N. Nagaosa and Y. Tokura "Geometrically stabilized skyrmionic vortex in FeGe tetrahedral nanoparticles", *Nat. Mater.*, 21, 305 (2022).
2. H. Idzuchi, F. Pientka, K.-F. Huang, K. Harada, Ö. Gül, Y. J. Shin, L. T. Nguyen, N.H. Jo, D. Shindo, R. J. Cava, P. C. Canfield & P. Kim, "Unconventional supercurrent phase in Ising superconductor Josephson junction with atomically thin magnetic insulator", *Nat. Commun.*, 12, 5332, 1 (2021).
3. D. Shindo, Z. Akase "Direct observation of electric and magnetic fields of functional materials", *Materials Science and Engineering: R.*, 142, 100564, 1 (2020).
4. D. Shindo, T. Tanigaki, and H. S. Park, "Advanced electron holography applied to electromagnetic field study in materials science", *Adv. Mater.*, 29, 1602216, 1 (2017).
5. M. Nakamura, F. Kagawa, T. Tanigaki, H. S. Park, T. Matsuda, D. Shindo, Y. Tokura, and M. Kawasaki, "Spontaneous polarization and bulk photovoltaic effect driven by polar discontinuity in LaFeO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> heterojunctions", *Phys. Rev. Lett.*, 116(15), 156801, 1 (2016).



# 量子ナノ磁性研究チーム

Quantum Nano-Scale Magnetism Research Team



大谷 義近 理学博士・チームリーダー  
yotani@riken.jp

## 研究分野

物理学／工学／材料科学

## キーワード

ナノ磁性、スピントロニクス、スピン流、スピンホール効果、エデルシュタイン効果、マグノン-フォノンカップリング

## 略歴

- 1989 慶應義塾大学院理工学研究科物理学専攻博士課程修了
- 1989 アイルランド ダブリン大学トリニティーカレッジ博士研究員
- 1991 フランス CNRS ルイ・ネール磁性物理研究所研究員
- 1992 慶應義塾大学工学部物理学科 助手
- 1995 東北大学工学部材料物性学科 助教授
- 2001 理化学研究所 量子ナノ磁性研究チーム チームリーダー
- 2004 東京大学物性研究所ナノスケール物性研究部門 教授 (現職)
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 量子ナノ磁性研究チーム チームリーダー (現職)

## チーム紹介・概要



当チームでは、金属・半導体・絶縁体・高分子から成るナノトンネル接合や磁性体／非磁性体複合ナノ構造体を作製し、スピン流 (スピン波や伝導電子スピン等のスピン角運動量の輸送現象) や軌道流 (電子の軌道自由度の流れ) を媒介して生じる磁壁移動や磁化ダイナミクスの量子的振る舞いに関する研究を行っている。特に、電子スピン、マグノン、フォノン等の準粒子間の角運動量変換 (スピン変換) や結合機構を理解すると共に、その高効率化に取り組む。さらに、基本原理である交換相互作用あるいはスピン軌道相互作用等を通じてスピン変換を制御・操作する新奇な手法を開発し、革新的なエネルギーハーベスティングに資する省電力スピントロニクス素子の実現を目指す。

## 主要メンバー

(上級研究員) 近藤 浩太

(研究員)

KIM Junyeon, PUEBLA NUNEZ Jorge Luis

(訪問研究員) LYONS Thomas

(JRA・研修生) HWANG Yunyoung

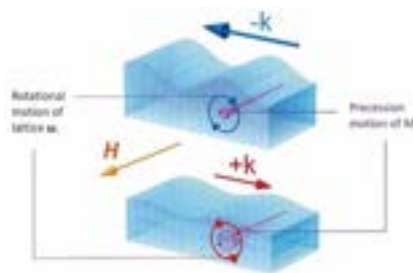
(研修生)

WU Mingxing, WANG Handa, LIAO Liyang

## 新奇スピントロニクスデバイスの実現をめざして

### —力学回転を用いたスピン-電流変換—

スピントロニクスのキーコンセプトであるスピン変換は、電気、光、音、振動、熱の間の様々な興味深いスピンを介したナノスケールでの相互変換現象の総称である。その中でも、スピンと機械振動の相互作用の解明はあまり研究されておらず、喫緊の課題である。当グループでは、この問題に取り組み、スピンを媒介して機械的振動から電流への変換を行う新しいハイブリッドデバイスの実現可能性を実証した。強磁性層に表面弾性波 (SAW) を照射すると周期的な弾性変形が起こり、強磁性共鳴 (FMR) のような歳差運動の磁化ダイナミクスが誘起され、隣接する非磁性層へスピン流が発生する。SAWと磁性層との結合はさらに興味深い効果をもたらす。我々は、磁化が格子の回転運動と結合する機構である磁気回転結合により、SAWの減衰に非相反が生じることを実証した (図参照)。100%の非相反性が達成され、磁気音響整流器などの応用展開への可能性を示した。また、非相反性だけでなく、音響キャピティを素子化することでマグノン-フォノン結合を強結合領域まで高めることにも挑戦している。



磁気回転結合の模式図。SAWは、伝搬方向に依存して時計回りまたは反時計回りの回転運動を格子に誘起する (図中の青と赤の向きのサイクルで示されるように)。この回転運動は、磁気異方性の変化を通じて磁化と結合し、回転する有効磁場を生じる。この有効磁場は、磁化の歳差運動を抑制または増強し (紫のコーン)、その結果、SAWに非相反減衰を引き起こす。

## 主要論文

1. K. Kondou, H. Chen, T. Tomita, M. Ikhlas, T. Higo, A. H. MacDonald, S. Nakatsuji, and Y. Otani, "Giant field-like torque by the out-of-plane magnetic spin Hall effect in a topological antiferromagnet", *Nature Commun.* 12, 6491 (2021).
2. J. Kim, D. Go, H. Tsai, D. Jo, K. Kondou, H-W Lee, and Y. Otani, "Nontrivial torque generation by orbital angular momentum injection in ferromagnetic-metal/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> trilayers", *Phys. Rev. B* 103, L020407 (2021).
3. Y. Hwang, J. Puebla, M. Xu, A. Lagarrigue, K. Kondou, and Y. Otani, "Enhancement of acoustic spin pumping by acoustic distributed Bragg reflector cavity", *Appl. Phys. Lett.* 116, 252404 (2020).
4. M. Xu, K. Yamamoto, J. Puebla, K. Baumgaertl, B. Rana, K. Miura, H. Takahashi, D. Grundler, S. Maekawa and Y. Otani, "Nonreciprocal surface acoustic wave propagation via magneto-rotation coupling", *Sci. Adv.* 6, 1724 (2020).
5. M. Xu, J. Puebla, F. Auvray, B. Rana, K. Kondou and Y. Otani, "Inverse Edelstein effect induced by magnon-phonon coupling", *Phys. Rev. B* 97, 180301(R) (2018).

# 量子システム理論研究チーム

Quantum System Theory Research Team



**LOSS Daniel** Ph.D.・チームリーダー

loss.daniel@riken.jp

## 研究分野

物理学

## キーワード

強相関電子系、ナノデバイス、スピン-軌道相互作用、トポロジカル量子物質、マヨラナフェルミオンとパラフェルミオン

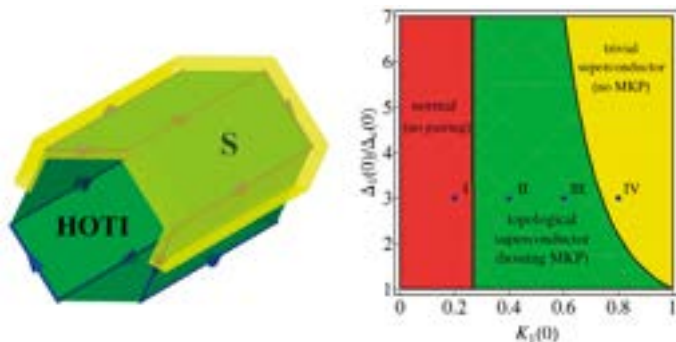
## 略 歴

- 1985 スイス チューリッヒ大学理論物理学 博士学位取得
- 1985 スイス チューリッヒ大学 博士研究員
- 1989 米国 イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 フェロー
- 1991 米国 IBMTーマス・J・ワトソン研究所 研究員
- 1993 カナダ サイモンフレーザー大学 助教授
- 1995 同 准教授
- 1996 スイス パーゼル大学物理学科 教授(現職)
- 2012 理化学研究所 創発量子システム研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 量子システム理論研究チーム チームリーダー(現職)
- 2021 同 量子コンピュータ研究センター 半導体量子情報デバイス理論研究チーム チームリーダー(現職)

## 高次のトポロジカル絶縁体におけるマヨラナ・クラマース対

高次のトポロジカル絶縁体は、近年のトポロジカル物性の研究で実現した系である。これらはバルクや表面では絶縁体であるが、二つの面の境界、つまりエッジ(辺)では進行波の状態をもつ。我々はこの高次のトポロジカル絶縁体と超伝導近接効果による、調整不要なマヨラナ・クラマース対の実現を可能にする系を設計した。

我々の手法は、ビスマス細線に超伝導体をハーフカバーで取り付けるという、既存の実験的技術で実現可能なものである。つまり、高次のトポロジカル絶縁体上の、ヘリシティが同一の2辺にまたがるようにs波超伝導体を接合すると、適度な電子間相互作用により1辺でよりも2辺間でのペアリングを好むことから、マヨラナ・クラマース対が形成されることが分かった。結果として、この手法では磁場や局所的なゲートを必要としない。これはトポロジカルな状態の探索において強く望まれてきた性質である。



左図：超伝導体(黄色)と細線(緑)による高次トポロジカル絶縁体の概念図

右図：左図のモデルの系の相図

Chen-Hsuan Hsu, Peter Stano, Jelena Klinovaja, and Daniel Loss, "Majorana Kramers Pairs in Higher-Order Topological Insulators," *Phys. Rev. Lett.* 121, 196801 (2018) © APS

## 主要論文

1. Ch.-H. Hsu, P. Stano, J. Klinovaja, D. Loss, "Helical Liquids in Semiconductors", *Semicond. Sci. Technol.* 36, 123003 (2021).
2. C.-H. Hsu, F. Ronetti, P. Stano, J. Klinovaja, and D. Loss, "Universal conductance dips and fractional excitations in a two-subband quantum wire", *Phys. Rev. Research* 2, 043208 (2020).
3. P. Aseev, P. Marra, P. Stano, J. Klinovaja, D. Loss, "Degeneracy lifting of Majorana bound states due to electron-phonon interactions", *Phys. Rev. B*, 99, 205435 (2019)
4. Ch.-H. Hsu, P. Stano, J. Klinovaja, D. Loss, "Majorana Kramers pairs in higher-order topological insulators", *Phys. Rev. Lett.*, 121, 196801 (2018).
5. J. Klinovaja, P. Stano, D. Loss, "Topological Floquet Phases in Driven Coupled Rashba Nanowires", *Phys. Rev. Lett.*, 116, 176401 (2016).

## チーム紹介・概要



当チームでは半導体、磁性ナノ構造におけるスピンとトポロジカル現象を中心として量子物性理論の研究を行っている。我々は固体中の新規なスピン/トポロジカル相や新たな機構の探索をテーマとしている。具体的には、螺旋状のスピン構造、トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体などに注目している。これらはマヨラナフェルミオンやパラフェルミオンのようなトポロジカル量子状態を実現する可能性を秘めている。また、一次元系と準一次元系の朝永-ラッティンジャー液体、半導体中の核スピンや低次元系の多体効果、(分数)量子ホール効果、強相関電子系、スピン軌道相互作用、量子輸送現象にも注目する。

## 主要メンバー

(上級研究員) STANO Peter

# スピン物性理論研究チーム

Spin Physics Theory Research Team



## スピン—電流変換の理論

スピントロニクスデバイスを、従来のエレクトロニクスに組み込むためには、スピンの運ぶ信号を電気信号に変換することが必要である。我々はスピンの流れの制御及び電流への変換の可能性を理論的に研究している。スピンと電荷の変換は磁化構造やスピン軌道相互作用など多様な起源により引き起こされる。例えば磁化構造にスピン偏極電流を流すと磁化構造が引きずられて流れるというスピン移行効果や、磁化構造中で電子が受けるスピンバリー位相効果、スピン起電力などがよく知られている。またスピン軌道相互作用はスピンホール効果や逆スピンホール効果などスピンと電荷をつなぐ重要な効果を生み出している。我々の研究ではこれらを含むスピン電荷変換現象を有効ゲージ結合という視点で整理し電磁気現象との統一の視点から記述する枠組みを与えることに成功した。この成果はスピントロニクスと従来のエレクトロニクスの融合に大きく貢献すると期待される。

また、スピン流の概念を用いたスピントロニクス現象の記述には原理的な不定性が避けられないが、我々はスピンと電荷の変換現象を、駆動場と測定場を線形応答理論で直接結びつける理論を展開し、不定性なく記述する定式化も行った。



強磁性金属中では伝導電子が磁化構造中を運動する際にスピンの回転をおこし量子力学的位相が生じる。この位相が有効的な磁場や電場としてはたらきスピンに結合する有効電磁場が発生する。

### 主要論文

1. H. Funaki, and G. Tataro, "Hydrodynamic theory of chiral angular momentum generation in metals", *Phys. Rev. Research*, 3, 023160(9) (2021).
2. G. Tataro, C. A. Akosa, and R. M. Otxoa de Zuazola, "Magnon pair emission from a relativistic domain wall in antiferromagnets", *Phys. Rev. Research*, 2, 043226(17) (2020).
3. G. Tataro, "Effective gauge field theory of spintronics", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 106, 208-238 (2019).
4. C. A. Akosa, O. A. Tretiakov, G. Tataro, and A. Manchon, "Theory of the Topological Spin Hall Effect in Antiferromagnetic Skyrmions: Impact on Current-Induced Motion", *Phys. Rev. Lett.*, 121, 097204(5) (2018).
5. T. Kikuchi, T. Koretsune, R. Arita, and G. Tataro, "Dzyaloshinskii-Moriya Interaction as a Consequence of a Doppler Shift due to Spin-Orbit-Induced Intrinsic Spin Current", *Phys. Rev. Lett.* 116, 247201 (1-6) (2016). (PRL Editors'Suggestion).

多々良 源 博士 (理学)・チームリーダー  
gen.tatara@riken.jp

### 研究分野

物理学／工学／材料科学

### キーワード

スピントロニクス、スピン - 軌道相互作用、磁壁、モノポール、スピン流、メタマテリアル

### 略 歴

- 1992 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程修了
- 1992 東京大学大学院理学系研究科 研究生
- 1994 理化学研究所 基礎科学特別研究員
- 1996 大阪大学大学院理学研究科 助手
- 2004 科学技術振興機構 さきがけ研究員
- 2005 首都大学東京都教養学部理工学系 (大学院理工学研究科) 准教授
- 2012 理化学研究所 創発スピン物性理論研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 スピン物性理論研究チーム チームリーダー (現職)

### チーム紹介・概要



物性研究の目的は物質の最高性能を引き出すことである。当チームではその中でも特に電子のもつ微小磁石、スピン、に関わる新現象を理論的に開拓している。現在の技術であるエレクトロニクスでは電子の電荷と電流のみを利用しているが、スピンの制御が可能となればスピンのもつ情報も加えたスピントロニクスが実現され、今よりもはるかに多量の情報を高速で、また低いエネルギー消費で処理することが可能となる。特に現在重要視されている効果としては物質中のスピンにはたらく強い量子相対論効果があり、これをうまく用いると非常に強い磁石や、スピンのもつ情報を電気信号に高効率で変換したりすることが実現される。解析には主に場の理論という手法を用いている。

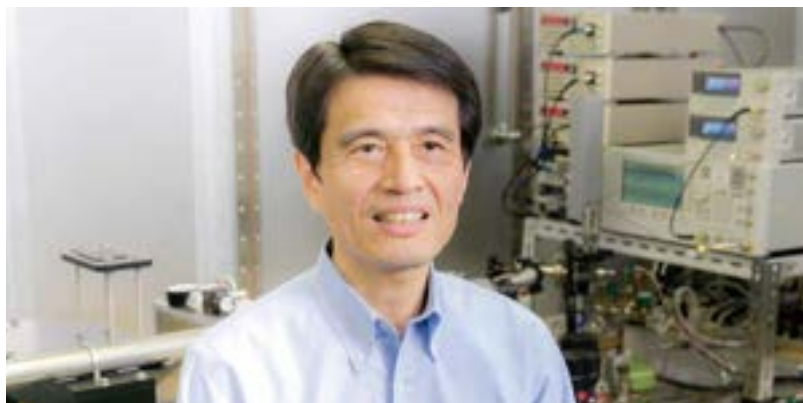
### 主要メンバー

(研究員)

AL Assadi Mohammad Hussein Naseef  
(特別研究員) QU Guanxiong, 山口 皓史  
(客員研究員) AKOSA Collins Ashu

# 創発物性科学研究支援チーム

Emergent Matter Science Research Support Team



秋元 彦太 理学博士・チームリーダー  
hikota@riken.jp

## 研究分野

材料科学／物理学

## キーワード

微細加工、試料評価、利用者教育

## 略 歴

- 1988 東京大学物性研究所 助手
- 1990 大阪市立大学大学院理学研究科 博士学位取得
- 1996 オランダ ライデン大学 客員研究員
- 1998 米国 フロリダ大学 博士研究員
- 2001 米国 マサチューセッツ大学 上級博士研究員
- 2003 理化学研究所 ナノサイエンス研究施設 研究技術開発支援チーム 開発研究員
- 2008 同 基幹研究所 支援チーム チームヘッド
- 2013 同 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 創発物性科学研究支援チーム チームリーダー (現職)

## チーム紹介・概要



創発物性科学研究施設はナノメータースケールの加工・観察、超精密測定・超微細信号の観測を進める拠点として設置された。施設にはISO Class 5のクリーンルーム、ケミカルルーム、振動や電磁波などの外部擾乱に対処した実験室が設置され、クリーンルームには微細加工に必要な数多くの装置が設置されている。当チームはナノメータースケールでの観察・微細加工に必要な技術・研究支援、技術開発を行うため設置された。チームはデバイス試料の作成や評価に関連する支援、施設利用の研究者の教育、クリーンルームや装置の維持・環境整備などを通して研究者への支援を行う。

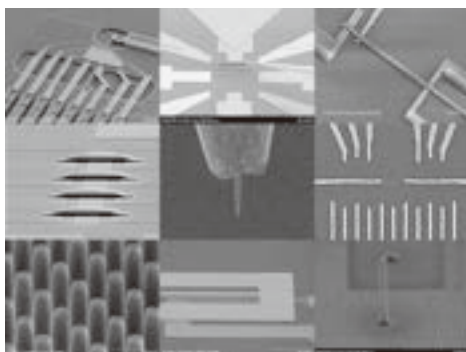
## 主要メンバー

(テクスタ) 中臣 礼子, 田口 佳男

## 微細加工素子作成を強力にサポート

創発物性科学研究センターでは、量子デバイス、スピンドバイスや量子コンピュータなど、微細加工素子による省エネルギーデバイス・高速情報処理デバイスの実現を目標に、研究が行なわれている。こうした素子・デバイスの実現には、最新の微細加工装置の導入とともに、装置を常に最善の状態に保つことや研究者の様々な要望を踏まえたノウハウの提供や技術支援が望まれる。

当チームはこうした微細加工技術支援の要望に答え研究活動を強力にサポートする。創発物性科学研究施設内のクリーンルームには電子ビーム露光装置、マスクレス露光装置をはじめとする露光装置、蒸着装置、スパッタ装置などの成膜装置、酸アルカリ水溶法・イオンエッチングなどの化学的・物理的エッチング装置、走査型電子顕微鏡などの観測装置など設置されており、10 nm から  $\mu\text{m}$  オーダーにわたる微細加工素子が作成されている。我々は装置の導入・整備・維持、安全管理、装置利用講習、技術開発、ノウハウの提供を行い、省エネルギーデバイスや量子情報処理デバイスの実現に向けた研究者の弛まぬ努力を強力に支援する。



クリーンルーム内で作成された試料素子の顕微鏡写真

## 主要論文

1. M. Hirao, D. Yamanaka, T. Yazaki, J. Osano, H. Iijima, T. Shiokawa, H. Akimoto, T. Meguro, "STM Study on Adsorption Structures of Cs on the As-Terminated GaAs(001)(2x4) Surface by Alternating Supply of Cs and  $\text{O}_2$ ", *IEICE Transactions on Electronics*, E99C, 376 (2016).
2. H. Ikegami, H. Akimoto, D. G. Rees, and K. Kono, "Evidence for Reentrant Melting in a Quasi-One-Dimensional Wigner Crystal", *Phys. Rev. Lett.*, 109, 236802 (2012).
3. M. Shimizu, H. Akimoto, K. Ishibashi, "Electronic Transport of Single-Wall Carbon Nanotubes with Superconducting Contacts", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, 035102 (2011).
4. S. M. Huang, Y. Tokura, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha, K. Ono., "Spin Bottleneck in Resonant Tunneling through Double Quantum Dots with Different Zeeman Splittings", *Phys. Rev. Lett.*, 104, 136801 (2010).
5. H. Akimoto, J. S. Xia, D. Candela, W. J. Mullin, E. D. Adams, N. S. Sullivan, "Giant viscosity enhancement in a spin-polarized fermi liquid", *Phys. Rev. Lett.*, 99, 095301 (2007).

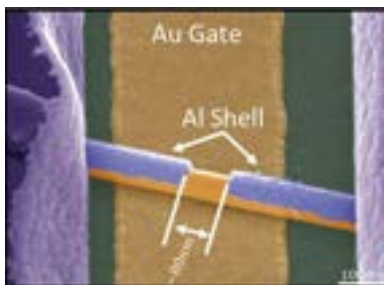
# 量子効果デバイス研究チーム

Quantum Effect Device Research Team



## マヨラナ量子ビットに向けた超伝導体/InAs ナノワイアハイブリッド構造の研究

量子コンピュータの開発が活発に進められているが、量子状態を安定に維持するためにさけるべきデコヒーレンスやノイズの問題は、依然、大規模化に向けた大きな問題である。マヨラナ粒子をもちいたトポロジカル量子ビットは、安定に量子状態を保持できると考えられるため、この問題を大きく軽減できる新たな量子ビットとして期待できる。残念ながらマヨラナ粒子はその存在がいまだ実験的に確証が得られたとは言えない状況であるが、我々はマヨラナ量子ビットに向け半導体ナノワイアと超伝導体、トポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッド構造を用いて研究を行っている。図は InAs ナノワイアを分子線エピタキシー法で成長し、さらに真空を破ることなく超伝導体であるアルミニウムを蒸着することにより急峻な界面を持つ SNS 型ジョセフソン接合 (S: 超伝導体、N: 正常金属) の電子顕微鏡写真を示す。本研究では、ナノワイアジョセフソン接合をもつ RF-SQUID ループをマイクロ波共振器と結合することにより、マヨラナ束縛状態の分光測定を目指している。なお、本研究は Thomas Schäpers 教授 (ドイツ・ユーリッヒ研究所) との共同研究である。



InAs ナノワイアとアルミニウムで作製した SNS 型ジョセフソン接合の電子顕微鏡写真

### 主要論文

1. P. Zellekens, R. Deacon, P. Perla, H. A. Fonseka, T. Mörstedt, S. A. Hindmarsh, B. Bennemann, F. Lentz, M. I. Lepsa, A. M. Sanchez, D. Grützmacher, K. Ishibashi, and T. Schäpers, "Hard-Gap Spectroscopy in a Self-Defined Mesoscopic InAs/Al Nanowire Josephson Junction", *Phys. Rev. Applied* 14, 054019 (2020).
2. R. Wang, R. S. Deacon, J. Sun, J. Yao, C. M. Lieber, K. Ishibashi, "Gate Tunable Hole Charge Qubit Formed in a Ge/Si Nanowire Double Quantum Dot Coupled to Microwave Photons", *Nano Lett.* 19, 1052-1060 (2019).
3. J. Sun, R. Deacon, R. Wang, J. Yao, C. Lieber, K. Ishibashi, "Helical Hole State in Multiple Conduction Modes in Ge/Si Core/Shell Nanowire", *Nano Lett.* 18, 6144-6149 (2018).
4. R. S. Deacon, J. Wiedenmann, E. Bocquillon, T. M. Klapwijk, P. Leubner, C. Brüne, S. Tarucha, K. Ishibashi, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, "Josephson radiation from gapless Andreev bound states in HgTe-based topological junctions", *Phys. Rev. X* 7, 021011 (2017).
5. A. Hida, and K. Ishibashi, "Molecule-induced quantum confinement in single-walled carbon nanotube", *Appl. Phys. Ex.*, 8, 045101 (2015).

石橋 幸治 工学博士・チームリーダー  
kishiba@riken.jp

### 研究分野

工学/物理学

### キーワード

カーボンナノチューブ、半導体ナノワイア、量子ドット、トポロジカル超伝導、量子情報デバイス

### 略歴

- 1988 大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻電気工学分野 博士課程修了
- 1988 理化学研究所 国際フロンティア研究システム 研究員
- 1991 同 半導体工学研究室 研究員
- 1996 デルフト工科大学 (オランダ) 訪問研究員
- 2003 理化学研究所 石橋極微デバイス工学研究室 主任研究員 (現職)
- 2003 千葉大学大学院 客員教授 (現職)
- 2005 東京理科大学大学院 連携教授 (現職)
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 量子効果デバイス研究チーム チームリーダー (現職)
- 2017 大阪大学大学院 招聘教授 (現職)

### チーム紹介・概要



当チームではナノスケールで発現する量子効果を利用した新機能・省エネルギーナノデバイスの研究開発を行っている。Si 微細トランジスタ、カーボンナノチューブ、半導体ナノワイア、トポロジカル絶縁体、超伝導体などを用いて、ナノスケールで異種材料、異種機能をハイブリッド化する技術を開発するとともに、そこに発現する新しい量子現象を明らかにし、それを利用した新機能の探索を行う。それにより電子、スピン、光、励起子、クーパペアなどを制御する技術を開発し、量子情報デバイスなどへ応用する。

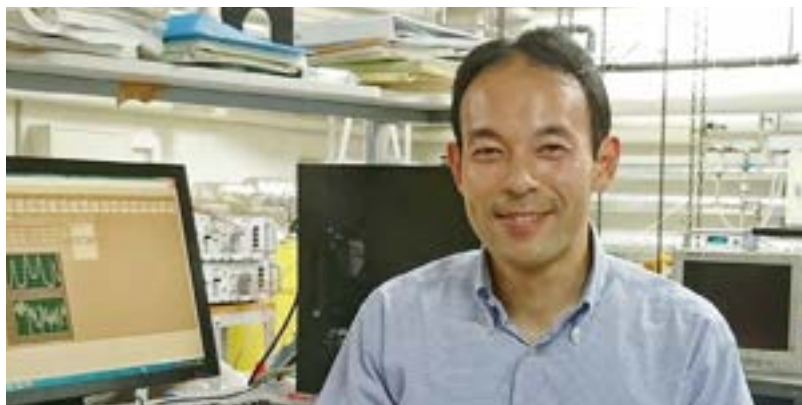
### 主要メンバー

(専任研究員)

大野 圭司, DEACON Russell Stewart  
(リサーチアソシエイト) ZELLEKENS Patrick

# 量子電子デバイス研究チーム

Quantum Electron Device Research Team



山本 倫久 博士 (理学)・チームリーダー  
michihisa.yamamoto@riken.jp

## 研究分野

物理学/工学

## キーワード

2次元電子系、単一電子制御、ナノデバイス、量子コヒーレンス、量子相関

## 略 歴

- 2004 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程修了 (理学)
- 2004 東京大学大学院工学系研究科理工学専攻 助手
- 2007 同 助教
- 2014 同 講師
- 2017 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任准教授
- 2017 理化学研究所創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 量子電子デバイス研究ユニット ユニットリーダー
- 2020 同 量子電子デバイス研究チーム チームリーダー (現職)

## ユニット紹介・概要



当チームでは、固体中の量子自由度の制御と伝送の技術に基づいた量子電子デバイスの創製に取り組む。具体的には、半導体微細構造中を伝搬する電子の量子状態を1電子単位で制御する量子電子光学実験や原子層物質における新たな量子自由度の伝送・制御の実験によって量子コヒーレンスの広がりや量子相関、量子変換の物理を解明し、それに基づいた量子デバイスの指導原理を開発する。同時に、高度な量子技術を用いて物性科学の問題をミクロな視点から解き明かし、量子技術と物性科学を融合させた新しいフロンティアを切り拓く。

## 主要メンバー

(研究員) 島崎 佑也  
(特別研究員)

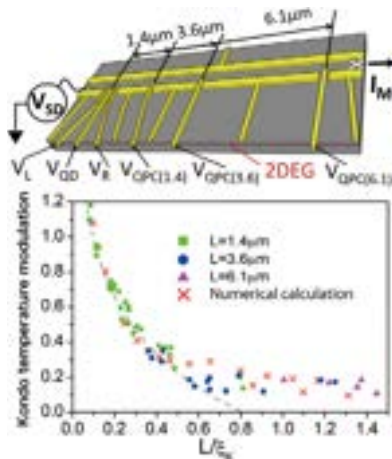
TU Ngoc Han, POMARANSKI David,  
伊藤 諒

## 近藤遮蔽雲の観測

局在スピンの伝導電子との相互作用によって生じる近藤効果は、超伝導と並んで最も典型的な電子間相互作用効果として知られる。近藤効果が起きているとき、局在スピンと結合する伝導電子が雲のように広がって局在スピンを遮蔽することから、その状態は「近藤雲」とも呼ばれる。近藤雲の大きさは、複数の局在スピンを持つ多くの物質の性質を決める重要なパラメータだが、過去50年にわたり、その観測実験の成功例はなかった。

本研究では、半導体の人工原子に局在スピンを閉じ込め、これが周囲の伝導電子と相互作用することで形成される近藤雲を電子の波の干渉計に埋め込んだ。この独自の実験系を用いて近藤雲を観察した結果、近藤雲が、局在スピンと伝導電子の間の量子力学的なスピン結合の強さを表す「近藤温度」の逆数に比例するサイズと普遍的な形状を有することを世界で初めて明らかにした。

本研究成果は、局在スピンが複数存在する電子間相互作用が強い物理系の理解の進展や、長距離スピン結合をベースにした新しい量子情報処理技術の開発に貢献すると期待できる。現在、複数の近藤雲が重なった場合について、更なる研究を進めている。



近藤雲の検出実験に用いられた試料の模式図と近藤雲の形状。量子ポイントコンタクトのゲート電圧 (VQPC) による近藤雲の変調具合を定量化することによって近藤雲の形状を得た。

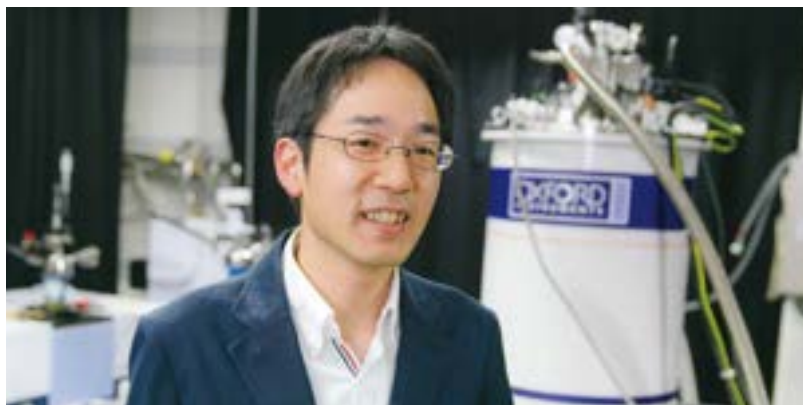
Figure taken from Nature 579, 210 (2020).

## 主要論文

1. M. Tanaka, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nomura, S. Tarucha, and M. Yamamoto, "Temperature-induced phase transitions in the correlated quantum Hall state of bilayer graphene", *Phys. Rev. B*, 105, 075427 (2022).
2. R. Ito, S. Takada, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, and M. Yamamoto, "Coherent beam splitting of flying electrons driven by a surface acoustic wave", *Phys. Rev. Lett.*, 126, 070501 (2021).
3. M. Tanaka, Y. Shimazaki, I. V. Borzenets, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Tarucha, and M. Yamamoto, "Charge Neutral Current Generation in a Spontaneous Quantum Hall Antiferromagnet", *Phys. Rev. Lett.*, 126, 016801 (2021).
4. I. V. Borzenets, J. Shim, J. C. H. Chen, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, H.-S. Sim, and M. Yamamoto, "Observation of the Kondo screening cloud", *Nature*, 579, 210 (2020).
5. Y. Shimazaki, M. Yamamoto, I. V. Borzenets, K. Watanabe, T. Taniguchi, and S. Tarucha, "Generation and detection of pure valley current by electrically induced Berry curvature in bilayer graphene", *Nat. Phys.*, 11, 1032 (2015).

# 動的創発物性研究ユニット

Dynamic Emergent Phenomena Research Unit



賀川 史敬 博士 (工学)・ユニットリーダー  
fumitaka.kagawa@riken.jp

## 研究分野

材料科学 / 物理学

## キーワード

強相関電子系、相制御、走査型プローブ顕微鏡、スペクトロスコピー

## 略 歴

- 2006 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程修了 博士 (工学)
- 2006 日本学術振興会特別研究員 (PD)
- 2007 科学技術振興機構 ERATO 十倉マルチフェロイクスプロジェクト 研究員
- 2010 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任講師
- 2012 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 講師
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 動的創発物性研究ユニット ユニットリーダー (現職)
- 2017 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 准教授
- 2022 東京工業大学理学院物理学コース 教授 (現職)

## ユニット紹介・概要



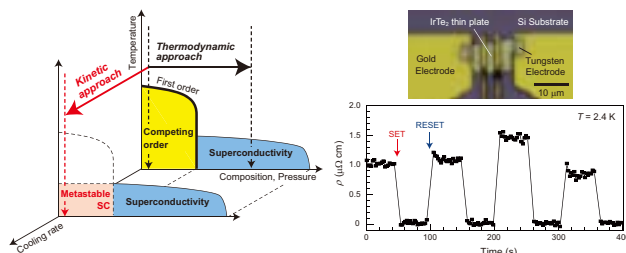
当ユニットでは、バルク試料及びデバイス化された強相関電子系が示す創発物性の動的側面を解明し、その学理構築を推進する。特に、トポロジカルな磁気秩序やドメイン壁などのサブミクロンスケールの構造体が外場下において示す動的現象について、ミリヘルツからギガヘルツ領域にわたる誘電応答や電気抵抗揺らぎなどのスペクトロスコピーを適用すると共に、走査型プローブ顕微鏡を用いた実空間観測及び局所物性計測も相補的に行なう。これらの知見を基に、物質中のトポロジカルな構造体が示す新奇物性の開拓・制御を目指す。

## 主要メンバー

(特別研究員) WANG Meng, 松浦 慧介  
(客員研究員) 大池 広志, 佐藤 拓朗

## 競合秩序相の背後に隠れた超伝導相を発現させる動力学的アプローチ

強相関電子系において超伝導状態の発現はしばしば、熱力学的により安定な磁気/電荷秩序相の形成によって妨げられている。そのため、超伝導を発現させるには物理圧力や化学圧力、キャリア濃度などの熱力学パラメータを制御して、超伝導相と競合秩序相の自由エネルギーバランスを変化させ、超伝導相の自由エネルギーが熱力学的に最安定となるように調整する必要があった。このような従来の熱力学的アプローチに対し、当グループでは競合秩序相の形成を避け超伝導を発現させる新しい手法として“動力学的アプローチ”を見出した。遷移金属ダイカルコゲナイド  $\text{IrTe}_2$  という物質を原理実証の舞台として選び、電流パルスを用いた急冷法 (最大で  $\sim 10^7$  K/s の急冷が可能) により、競合する電荷秩序相への1次転移を動的に避け、その背後にある超伝導相を準安定状態として発現させることに成功した。当ユニットで編み出した手法によって、準安定超伝導相の不揮発かつ可逆なスイッチングがパルス印加で可能となり、これは動力学的アプローチを用いた手法に特有な強みと言える。以上のことから、今回の発見は超伝導の発現と制御という文脈において新しい展開をもたらすものと期待される。



超急冷法を用いた超伝導の発現の概念図 (左)、実験に用いた薄片試料 (右上) と電流パルス印加を用いた超伝導-非超伝導の不揮発相制御の電気抵抗測定による実証 (右下)

## 主要論文

1. H. Oike, K. Takeda, M. Kamitani, Y. Tokura, and F. Kagawa, "Real-space observation of emergent complexity of phase evolution in micrometer-sized  $\text{IrTe}_2$  crystals" *Phys. Rev. Lett.* 127, 145701 (2021).
2. K. Matsuura, H. Oike, V. Kocsis, T. Sato, Y. Tomioka, Y. Kaneko, M. Nakamura, Y. Taguchi, M. Kawasaki, Y. Tokura, and F. Kagawa, "Kinetic pathway facilitated by a phase competition to achieve a metastable electronic phase", *Phys. Rev. B* 103, L041106 (2021).
3. T. Sato, W. Koshibae, A. Kikkawa, T. Yokouchi, H. Oike, Y. Taguchi, N. Nagaosa, Y. Tokura, and F. Kagawa, "Slow steady flow of a skyrmion lattice in a confined geometry probed by resistance narrow-band noise", *Phys. Rev. B* 100, 094410 (2019).
4. H. Oike, M. Kamitani, Y. Tokura, and F. Kagawa, "Kinetic approach to superconductivity hidden behind a competing order", *Sci. Adv.*, 4, eaau3489 (2018).
5. H. Oike, A. Kikkawa, N. Kanazawa, Y. Taguchi, M. Kawasaki, Y. Tokura, and F. Kagawa, "Interplay between topological and thermodynamic stability in a metastable magnetic skyrmion lattice", *Nat. Phys.*, 12, 62 (2016).

# 情報変換ソフトマター研究ユニット

Information Transforming Soft Matter Research Unit



宮島 大吾 博士 (工学)・ユニットリーダー  
daigo.miyajima@riken.jp

## 研究分野

化学／材料科学

## キーワード

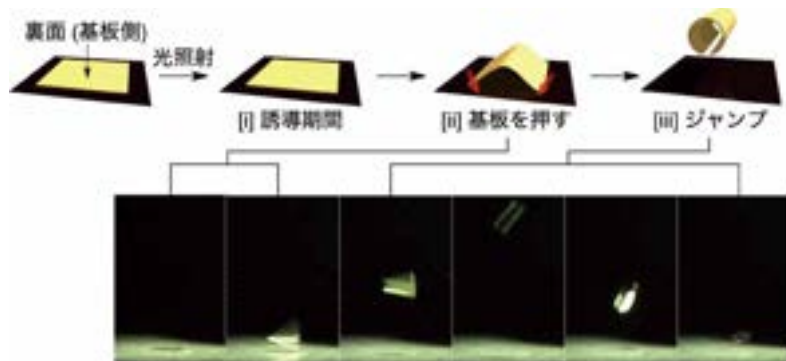
自己組織化、分子設計、2次元物質、高分子合成、ナノバイオテクノロジー

## 略歴

- 2013 東京大学工学系研究科 バイオエンジニアリング専攻 博士課程修了
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 特別研究員
- 2014 理化学研究所 創発物性科学研究センター 基礎科学特別研究員
- 2017 理化学研究所 創発物性科学研究センター 上級研究員
- 2018 理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 情報変換ソフトマター研究ユニット ユニットリーダー (現職)

## 環境のゆらぎを利用し駆動するアクチュエーター

我々はわずかな湿度変化に応答し半永久的に動き続ける薄膜アクチュエーターを開発した。この薄膜はグラフィティックカーボンナイトライドと呼ばれる炭素と窒素からなる2次元薄膜からなり、環境の湿度変化に応じて屈伸運動を示す。今回開発した薄膜は、従来のものより少ない水分量で大きくかつ高速に屈伸運動を行う。また、局所的な湿度変化を運動エネルギーに高効率に変換できるため、汎用の湿度計では感知できないほど小さな湿度変化にも応答する。さらに、薄膜への水分の吸着は熱や光にも影響を受けるため、さまざまな“環境の揺らぎ”を薄膜の運動エネルギーに変換することが可能である。本成果は、今後、エナジーハーベスティング技術、エネルギー変換材料の設計に大きな影響を与えると期待できる。



開発した薄膜に光を照射しジャンプする写真とその解説図

## ユニット紹介・概要



当ユニットでは有機合成化学・超分子化学を駆使することで、革新的機能性材料の開発に取り組んでいる。とりわけ自己組織化のプロセスを制御することで、速度論的生成物を選択的に作り分け、新しい機能発現に挑んでいる。

## 主要メンバー

- (研究員) 井深 遼太郎
- (特別研究員) DHARA Barun
- (テクスタ I) 犬塚 寛之
- (研究パートタイマー I) 若松 敏枝, 濱田 優子

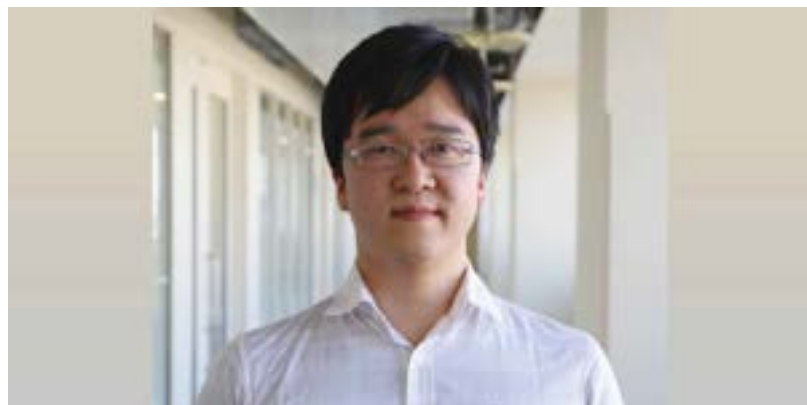
## 主要論文

1. K. V. Rao, D. Miyajima, A. Nihonyanagi and T. Aida "Thermally bisignate supramolecular polymerization", *Nat. Chem.* 9, 1133 (2017).
2. H. Arazoe, D. Miyajima, K. Akaike, F. Araoka, E. Sato, T. Hikima, M. Kawamoto and T. Aida, "An autonomous actuator driven by fluctuations in ambient humidity", *Nat. Mater.* 15, 1084 (2016).
3. J. Kang, D. Miyajima, T. Mori, Y. Inoue, Y. Itoh and T. Aida, "A rational strategy for the realization of chain-growth supramolecular polymerization", *Science*, 347, 646 (2015).
4. J. Kang, D. Miyajima, Y. Itoh, T. Mori, H. Tanaka, M. Yamauchi, Y. Inoue, S. Harada and T. Aida, "C5-Symmetric Chiral Corannulenes: Desymmetrization of Bowl Inversion Equilibrium via "Intramolecular" Hydrogen-Bonding Network", *J. Am. Chem. Soc.*, 136, 10640 (2014).
5. D. Miyajima, F. Araoka, H. Takezoe, J. Kim, K. Kato, M. Takata and T. Aida, "Ferroelectric columnar liquid crystal featuring confined polar groups within core-shell architecture", *Science*, 336, 209 (2012).



# 創発分子集積研究ユニット

Emergent Molecular Assembly Research Unit



佐藤 弘志 博士 (工学)・ユニットリーダー  
hiroshi.sato@riken.jp

## 研究分野

化学/材料科学

## キーワード

自己組織化、結晶工学、多孔質材料、表面・界面

## 略歴

- 2008 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程修了
- 2008 科学技術振興機構 ERATO 北川統合細孔プロジェクト 研究員
- 2010 京都大学 物質—細胞統合システム拠点 特任助教
- 2012 京都大学 物質—細胞統合システム拠点 特定拠点助教
- 2014 東京大学大学院工学系研究科化学生命工学攻 講師
- 2020 東京大学大学院工学系研究科化学生命工学攻 准教授
- 2020 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 さきかけ研究員 (兼任)
- 2021 理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 創発分子集積研究ユニット ユニットリーダー (現職)

## ユニット紹介・概要

当ユニットでは分子の集合・集積・配列様式を制御することで分子が持つ潜在性を引き出し、単一分子では実現不可能な破格の機能を創発することを目指している。具体的な研究テーマは次の通りである。

(1) トポロジカル結合の自在配列による材料創製: カテナンなどの『トポロジカル結合』の自在配列により、『結晶性』と『適応性』を併せ持つ新材料の創出を行う。

(2) 超分子重合における配列制御: 『超分子重合』では、ポリマー中のモノマー配列制御は困難である。配位結合に基づく『配位高分子』における配列制御に挑戦する。

## 主要メンバー

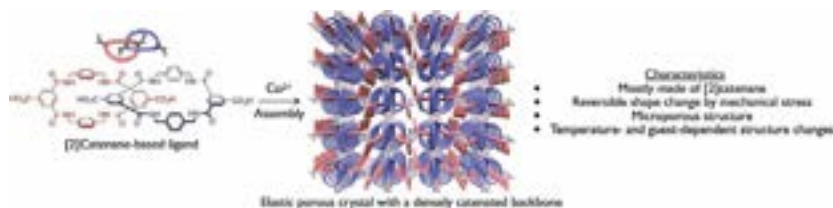
(特別研究員)

LEE Jet Sing, 程 博涵, 藤原 才也

(研修生) LENG Kunyi, YUAN Wei, 川越 美花

## トポロジカル結合からなる多孔性結晶

当ユニットでは、2つのリング状分子が鎖状につながったカテナン分子と金属イオンとを配位結合を通じて3次的に精密に配列させ、結晶を作製することに世界で初めて成功した。単結晶 X線構造解析を用いてこの結晶の構造を調べたところ、結晶の90%以上がカテナン分子からできていること、多数の微小な穴が空いた構造をしていること、温度変化に伴って構造を変えることなどが分かった。さらに、外から力を加えると形が変わり、力を除くと元の形に戻る、結晶でありながらまるでゴムのような性質を示すことを明らかにした。指でつまんだり離したりすることで、二酸化炭素などの気体分子を吸脱着できる革新的な多孔性材料の応用などにつながると期待できる。



カテナンからできた柔軟な多孔性結晶

## 主要論文

- W. Meng, S. Kondo, T. Itoh, K. Komatsu, J. Pirillo, Y. Hijikata, Y. Ikuhara, T. Aida, and H. Sato "An Elastic Metal-Organic Crystal with a Densely Catenated Backbone", *Nature*, 598, 298 (2021).
- H. Huang, H. Sato, J. Pirillo, Y. Hijikata, Y. S. Zhao, S. Z. D. Cheng, and T. Aida "Accumulated Lattice Strain as an Internal Trigger for Spontaneous Pathway Selection", *J. Am. Chem. Soc.*, 143, 15319 (2021).
- H. Sato, T. Matsui, Z. Chen, J. Pirillo, Y. Hijikata, and T. Aida "Photochemically Crushable and Regenerative Metal-Organic Framework", *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 14069 (2020).
- J.-M. Lee and H. Sato "Photoswitching to the Core", *Nat. Chem.*, 12, 584 (2020).
- S. Sugimoto, H. Sato, A. Hori, A. Mishima, Y. Harada, S. Kusaka, R. Matsuda, J. Pirillo, Y. Hijikata, and T. Aida "One-Step Synthesis of an Adaptive Nanographene MOF: Adsorbed Gas-Dependent Geometrical Diversity", *J. Am. Chem. Soc.*, 141, 15649 (2019).

# 計算物質機能研究ユニット

Computational Materials Function Research Unit



XU Yong Ph.D. ・ ユニットリーダー

yong.xu@riken.jp

## 研究分野

凝縮系物理学 / 材料科学

## キーワード

第一原理計算、トポロジカル量子物質、熱電効果、薄膜・界面、理論物質設計

## 略歴

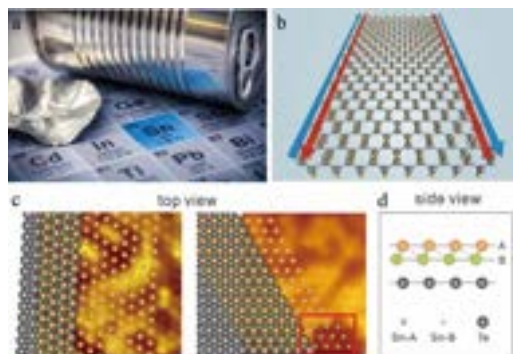
- 2010 中国 清華大学 凝縮系物理学 博士学位取得
- 2013 ドイツ フリッツハーバー研究所 アレクサンダーフォンフンボルト フェロー
- 2015 米国 スタンフォード大学 研究員
- 2015 中国 清華大学 助教
- 2015 理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 計算物質機能研究ユニット ユニットリーダー (現職)
- 2018 中国 清華大学 准教授
- 2021 中国 清華大学 教授 (現職)

## ユニット紹介・概要

当ユニットは、理論物性物理学、計算物質科学の研究を行う。主たる研究の興味は、第一原理電子状態計算の方法によって異常量子効果、新奇物性を理解、予言することにある。特に層状物質系、表面界面系などの低次元系や非自明な位相幾何学的秩序を持つ系の電子的、熱的、光学的、磁気的性質の研究を行い、低散逸のエレクトロニクス、高性能熱電材料、高効率太陽電池などの高機能物質の設計を目指す。メソスケールでの電子伝導、熱伝導、熱起電力などの輸送現象を取り扱う方法論の開発にも取り組む。

## 新しいグラフェン関連物質の発見:スタネン

物性物理学における最大の挑戦の一つは、室温で散逸のない電気伝導を実現することにある。我々は第一原理計算に基づき、グラフェンの関連物質であるスタネンが有力な候補物質であることを見出した。スタネン(ラテン語の錫を意味する stannum に由来する)は錫原子が2次元の歪んだ蜂の巣格子を形成することによってできる層状物質である。このスタネンやその誘導体では大きなギャップをもつ量子スピンホール状態が実現し、熱散逸がない電気伝導が実現するということがわかった。さらに巨大熱起電力やトポロジカル超伝導、室温に近い温度での量子異常ホール効果などの可能性があることも明らかにした。より最近では、分子線エピタキシー法によって単層のスタネンを合成することに成功している。これらの成果によってスタネンの異常物性の観測に向けた実験が大いに活性化することが期待される。



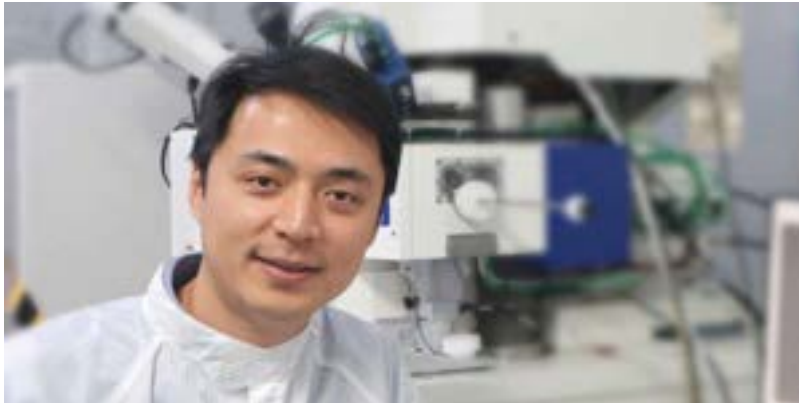
(a) 錫 (元素記号は Sn)。缶のメッキの材料などとして知られている。  
 (b) スタネンと呼ばれる錫の2次元膜をハロゲン元素で修飾したものの。室温でも端の矢印に沿って完全伝導性を示す。  
 (c)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3(111)$  面上のスタネンのSTM像とその原子構造模型。  
 (d) 原子構造模型を横から見た図。

## 主要論文

1. Y. Li, J. Li, Y. Li, M. Ye, F. Zheng, Z. Zhang, J. Fu, W. Duan, and Y. Xu "High-Temperature Quantum Anomalous Hall Insulators in Lithium-Decorated Iron-Based Superconductor Materials", *Phys. Rev. Lett.* 125, 086401 (2020).
2. C. Liu, Y. Wang, H. Li, Y. Wu, Y. Li, J. Li, K. He, Y. Xu, J. Zhang, and Y. Wang "Robust axion insulator and Chern insulator phases in a two-dimensional antiferromagnetic topological insulator", *Nature Mater.* 19, 522 (2020).
3. J. Falson, Y. Xu, M. Liao, Y. Zang, K. Zhu, C. Wang, Z. Zhang, H. Liu, W. Duan, K. He, H. Liu, J. H. Smet, D. Zhang, Q.-K. Xue "Type-II Ising Pairing in Few-Layer Stanene", *Science* 367, 1454 (2020).
4. J. Li, Y. Li, S. Du, Z. Wang, B.-L. Gu, S.-C. Zhang, K. He, W. Duan, and Y. Xu, "Intrinsic magnetic topological insulators in van der Waals layered  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ -family materials", *Sci. Adv.* 5, eaaw5685 (2019).
5. C. Wang, B. Lian, X. Guo, J. Mao, Z. Zhang, D. Zhang, B.-L. Gu, Y. Xu, and W. Duan, "Type-II Ising superconductivity in two-dimensional materials with spin-orbit coupling", *Phys. Rev. Lett.* 123, 126402 (2019).
6. J. Deng, B. Xia, X. Ma, H. Chen, H. Shan, X. Zhai, B. Li, A. Zhao, Y. Xu, W. Duan, S. Zhang, B. Wang, and J. Hou, "Epitaxial growth of ultraflat stanene with topological band inversion", *Nat. Mater.*, 17, 1081 (2018).
7. M. Liao, Y. Zang, Z. Guan, Y. Gong, K. Zhu, D. Zhang, Y. Xu, K. He, X.-C. Ma, S.-C. Zhang, and Q.-K. Xue, "Superconductivity in Few-Layer Stanene", *Nat. Phys.*, 14, 344 (2018).

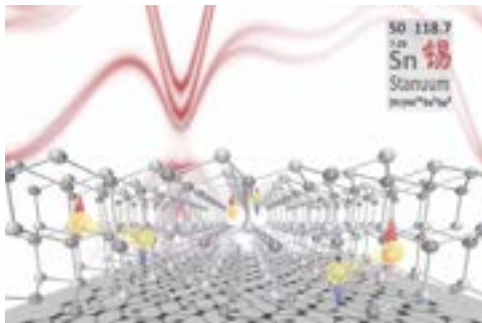
# 低次元輸送現象研究ユニット

Low-Dimensional Transport Research Unit



## 数原子層のスタネンにおける タイプIIのイジング対形成

近年、中心対称性の破れた二次元超伝導体は、従来期待される値をはるかに超えるような面内上部臨界磁場を示すことが明らかになってきている。この現象を説明するために、スピンの向きが面直に固定されたスピン分裂バンドから電子対が形成される、いわゆるイジング対形成機構が提唱されている。最近、非常に対称性の高い物質—数原子層のスタネン—において、面内の上部臨界磁場が増大することを観測した。これは、以前に同物質における超伝導の発見に続いて独自に見出したものである。さらに最近では、絶対零度に近づくと、臨界磁場が明確に増強することを見出した。しかしながら、スタネンは中心対称性を有しているために、観測された振る舞いはイジング超伝導に関する確立した理論では説明することができない。新たな機構の解明を目指した研究により、スピン軌道相互作用と物質の高対称性の結合によって生じる新しいタイプのイジング対形成—タイプ II のイジング対形成—を提唱した。本研究成果は、イジング超伝導の存在を強く示すものであり、またイジング超伝導の実現範囲を広げるものである。



スタネンの結晶構造とイジング的クーパー対の概念図。  
赤線はバンド分散であり、右上には錫の情報を示す。

### 主要論文

1. J. Falson, Y. Xu, M. Liao, Y. Zang, K. Zhu, C. Wang, Z. Zhang, Ho. Liu, W. Duan, K. He, Ha. Liu, J. H. Smet, D. Zhang, and Q.-K. Xue, "Type-II Ising pairing in few-layer stanene", *Science* 367, 1454 (2020).
2. M. Liao, Y. Zang, Z. Guan, H. Li, Y. Gong, K. Zhu, X.-P. Hu, D. Zhang, Y. Xu, Y.-Y. Wang, K. He, X.-C. Ma, S.-C. Zhang, and Q.-K. Xue, "Superconductivity in few-layer stanene", *Nat. Phys.* 14, 344 (2018).
3. D. Zhang, J. Falson, S. Schmult, W. Dietsche, and J. H. Smet, "Quasi-particle tunneling across an exciton condensate", *Phys. Rev. Lett.* 124, 246801 (2020).
4. M. Rafique, Z. Feng, Z. Lin, X. Wei, M. Liao, D. Zhang, K. Jin, and Q.-K. Xue, "Ionic liquid gating induced protonation of electron-doped cuprate superconductors", *Nano Lett.* 19, 7775 (2019).
5. M. Liao, Y. Zhu, J. Zhang, R. Zhong, J. Schneeloch, G. Gu, K. Jiang, D. Zhang, X. Ma, and Q.-K. Xue, "Superconductor-insulator transitions in exfoliated  $B_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  flakes", *Nano Lett.* 18, 5660 (2018).

ZHANG Ding Ph.D.・ユニットリーダー  
ding.zhang@riken.jp

### 研究分野

物理学

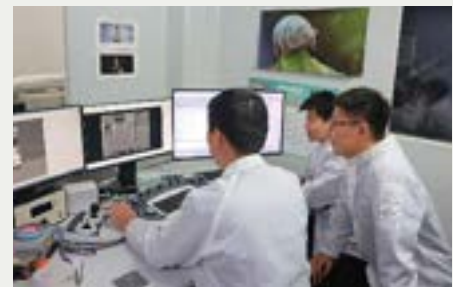
### キーワード

凝縮系物理学、高温超伝導体、ジョセフソン効果、低次元超伝導体、ファンデルワールスエピタキシー

### 略歴

- 2014 ドイツ マックスプランク固体研究所 博士課程 修了
- 2014 ドイツ シュトゥットガルト大学 Ph. D
- 2014 中国 清華大学 ポスドク研究員
- 2016 中国 清華大学 助教
- 2018 中国 清華大学 准教授 (現職)
- 2021 理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 低次元輸送現象研究ユニット ユニットリーダー (現職)

### ユニット紹介・概要



当研究ユニットでは、クーパー対形成を示す様々な低次元電子系を研究している。研究目的は、対生成の機構や波動関数の対称性などの基本的性質を明らかにすることである。さらに、特殊な条件下における低次元系物質において初めて可能になる新しい量子現象を探索している。実験手法は、ファンデルワールス物質系の原子層ヘテロ構造作製、リチウムや水素イオンのインターカレーション、極低温における磁場方位依存性と超強磁場下での物性評価などである。本分野の実験・理論の研究者との緊密な共同研究によって、これらの興味深い現象を総合的に理解することを目指している。

# トポロジカル量子現象研究ユニット

Topological Quantum Phenomenon Research Unit



梁田 博士 (理学)・ユニットリーダー  
tian.liang@riken.jp

## 研究分野

物理学

## キーワード

凝縮系物理学、トポロジカル量子物質、ベリー位相物理、熱電効果、強相関電子系

## 略 歴

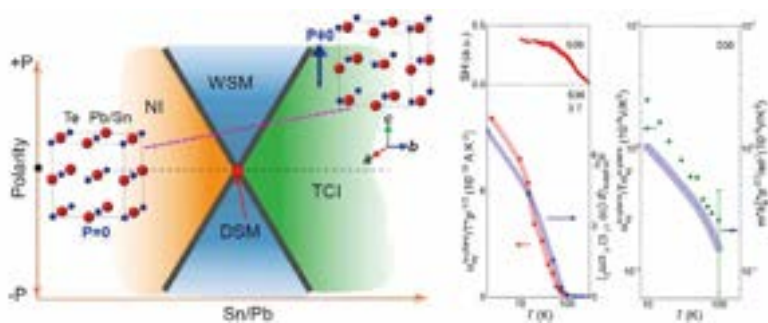
- 2016 米国 プリンストン大学物理学専攻博士
- 2016 米国 スタンフォード大学ポスドク研究員
- 2018 理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子伝導研究チーム 特別研究員
- 2021 中国 清華大学 助教 (現職)
- 2021 理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラムトポロジカル量子現象研究ユニット ユニットリーダー (現職)

## ユニット紹介・概要

当ユニットでは、凝縮系物理学実験、特にトポロジカル物質、強相関物質の新奇特性に関する研究を行う。まず基礎物理の観点からバンド構造における非自明な幾何学特性に着目し、これが系に及ぼす新奇な電気的、熱的、磁気的量子効果の測定を目指す。また、高性能熱電材料などの物質設計および散逸の少ないデバイスの構築など、応用に関しても取り組む。上記目標の達成のため、世界中の研究者と共同研究を進め、基礎物理および応用への理解の促進に繋げる。

## ネルンスト応答による、強誘電ワイル半金属におけるベリー曲率生成の検出

自由に調整可能な非磁性ワイル半金属の探求は、依然として難しい課題となっている。対称性を破るパラメータとして強誘電体秩序を操作することにより、ワイル半金属相のオン/オフを切り替え、フェルミレベルの周りのバンド構造を調整し、ベリー曲率を生成するワイルノードの運動量空間での分離距離を拡大/縮小することができる。我々はインジウムドーパされた  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  合金に基づく強誘電非磁性ワイル半金属の実現に成功した。ここで強誘電性の強さはインジウムドーピングレベルと Sn/Pb 比を調整することにより変動可能であり、系の空間反転対称性とミラー対称性は強誘電性により破れている。面外および面内配置における横熱電効果、すなわち Nernst 効果をベリー曲率に対する高い感度をもつ実験プローブとして用いることにより、磁場印加により再分布したワイルノードが生成するベリー曲率を検出した。この結果は、高い調整性をもつ強誘電体秩序と融合したクリーンな非磁性ワイル半金属の存在を示し、非磁性システムにおけるワイルフェルミオンを操作するための理想的なプラットフォームを提供する。



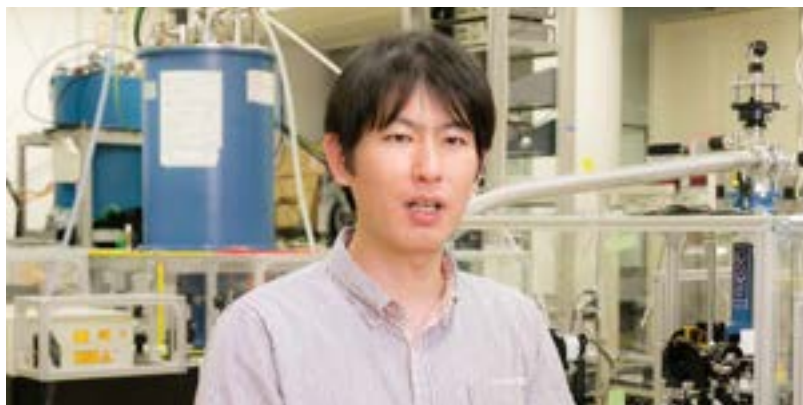
左のパネルは、In-PbSnTeの系でのトポロジカル相転移を示す。強誘電により空間反転対称性が破れるため、ワイル半金属相が出現する。右のパネルは、ワイルノードによるベリー曲率由来の異常ホール及び熱電ホール効果を示す。

## 主要論文

1. C. Zhang, T. Liang, M. S. Bahramy, N. Ogawa, V. Kocsis, K. Ueda, Y. Kaneko, M. Kriener, and Y. Tokura "Berry curvature generation detected by Nernst responses in ferroelectric Weyl semimetal", *PNAS*, 118 (44) e2111855118 (2021).
2. C. Zhang, T. Liang, N. Ogawa, Y. Kaneko, M. Kriener, T. Nakajima, Y. Taguchi, and Y. Tokura "Highly tunable topological system based on PbTe-SnTe binary alloy", *Phys. Rev. Materials*, 4:091201, (2020).
3. J.J. He, T. Liang, Y. Tanaka, and N. Nagaosa "Platform of chiral Majorana edge modes and its quantum transport phenomena", *Commun. Phys.*, 2(1):149, (2019).
4. K. Yasuda, H. Yasuda, T. Liang, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. Takahashi, N. Nagaosa, M. Kawasaki, Y. Tokura, "Nonreciprocal charge transport at topological insulator/superconductor interface", *Nat. Commun.* 10, 2734, (2019).

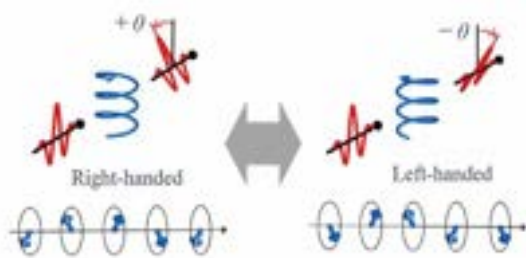
# 創発分光学研究ユニット

Emergent Spectroscopy Research Unit



## エレクトロマグノンが示す新奇光学現象の発見

マルチフェロイックと呼ばれる物質系ではスピンの秩序に由来した強誘電性が現れる。この時スピンの集団運動においては振動する電気分極と磁化が強く結合したエレクトロマグノンと呼ばれる状態が出現する。我々は、代表的なマルチフェロイックであるらせん型に配列したスピンの運動が、電気分極と磁化の応答を併せ持つエレクトロマグノンであることを明らかにした。一方で、らせん型のスピン構造は右手系、左手系で区別されるカイラリティを持つ。通常物質のカイラリティは結晶構造により決定され、一度固定されたカイラリティを制御することは困難である。我々はらせん型スピン構造が電気分極を持つことを利用し、カイラリティの電場制御を実証した。エレクトロマグノンに共鳴する周波数を持つ透過光の偏光を観測すると、カイラリティの反転に伴い、偏光回転の符号が反転することを見出した。これは自然旋光性と呼ばれる現象であり、カイラリティの最も基本的な性質として知られている。この結果は、カイラリティを利用した光制御の可能性を示している。



らせんスピンがつくる自然旋光性とその制御

### 主要論文

1. Y. Okamura, T. Morimoto, N. Ogawa, Y. Kaneko, G-Y. Guo, M. Kawasaki, N. Naogaosa, Y. Tokura, and Y. Takahashi, "Photovoltaic effect by soft phonon excitation", *PNAS* 119, e2122313119 (2022).
2. H. Shishikura, S. Ishiwata, Y. Taguchi, Y. Tokura, Y. Takahashi, "Role of Spin-Spiral Period for Anomalous Magnetic-Field-Induced Spectral Variation of Electromagnon Resonance in Multiferroic  $\text{Ba}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* 91, 033701 (2022).
3. S. Iguchi, R. Masuda, S. Seki, Y. Tokura and Y. Takahashi, "Enhanced gyrotropic birefringence and natural optical activity on electromagnon resonance in a helimagnet", *Nat. Commun.* 12, 6674 (2021).
4. Y. Hayashi, Y. Okamura, N. Kanazawa, T. Yu, T. Koretsune, R. Arita, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, Y. Tokura and Y. Takahashi, "Magneto-optical spectroscopy on Weyl nodes for anomalous and topological Hall effects in chiral  $\text{MnGe}$ ", *Nat. Commun.* 12, 5974 (2021).
5. R. Masuda, Y. Kaneko, Y. Tokura and Y. Takahashi, "Electric field control of natural optical activity in a multiferroic helimagnet", *Science* 372, 496 (2021).

高橋 陽太郎 Ph.D.・ユニットリーダー

youtarou.takahashi@riken.jp

### 研究分野

物理学／材料科学

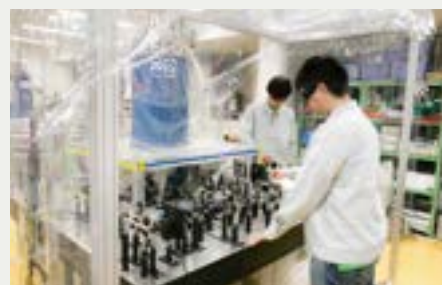
### キーワード

強相関電子系、マルチフェロイクス、テラヘルツ分光、超高速分光、非相対効果

### 略歴

- 2007 東京大学理学系研究科 博士課程修了
- 2007 科学技術振興機構 ERATO十倉マルチフェロイクスプロジェクト 研究員
- 2011 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任講師
- 2014 同 特任准教授
- 2014 理化学研究所創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 創発分光学研究ユニット ユニットリーダー (現職)
- 2016 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 准教授 (現職)

### ユニット紹介・概要



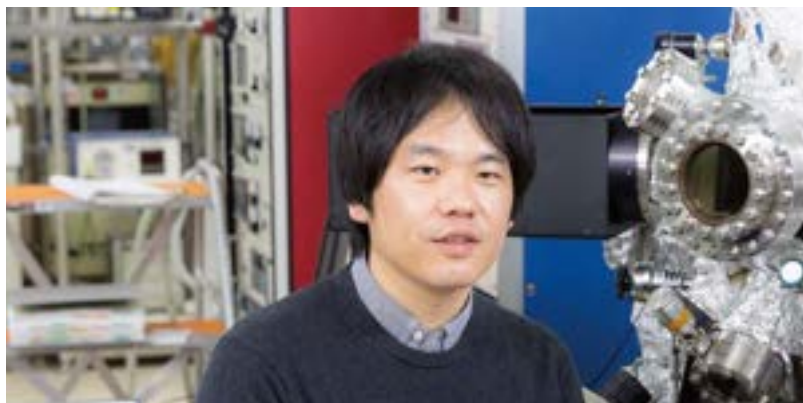
光学と物質の相互作用は古くから物理学の主要な研究トピックのひとつである。スペクトロスコピーは物性現象を理解するために重要な役割を果たし、一方で物質中での創発現象が全く新しい光学現象を生み出すこともある。当ユニットでは、強相関電子系に現れる様々な新奇現象の光学応答に着目し、以下のテーマを中心とした研究を行っている。(1) 誘電性と磁性的強い結合効果により現れる電気磁気光学効果の開拓。(2) 光による磁性と誘電性の制御。(3) 固体中のトポロジーにより生じる光応答の研究。これらの研究を通して、新しい光物性の開拓と、応用も視野に入れた光機能性の展開を目指している。

### 主要メンバー

(客員研究員) 岡村 嘉大

# 創発機能界面研究ユニット

Emergent Functional Interface Research Unit



中野 匡規 Ph.D.・ユニットリーダー  
mnakano@riken.jp

## 研究分野

物理学／工学／化学／材料科学

## キーワード

薄膜・界面、電界効果デバイス、強相関酸化物、2次元物質、ファンデルワールスエピタキシー

## 略 歴

- 2009 東北大学大学院理学研究科 博士課程 修了
- 2009 東北大学金属材料研究所 博士研究員
- 2009 ジュネーブ大学固体物理部門 博士研究員
- 2010 理化学研究所強相関量子科学研究グループ 博士研究員
- 2012 東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系 専攻 助教
- 2013 東北大学金属材料研究所 助教
- 2014 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任講師
- 2019 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任准教授 (現職)
- 2019 理化学研究所創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 創発機能界面研究ユニット ユニットリーダー (現職)

## ファンデルワールス超構造の創発物性

固体中を運動する電子を2次元平面に閉じ込めると、3次元のときとはまるで異なる振る舞いを示すようになる。このような2次元電子系は、半導体ヘテロ構造や電界効果デバイスなどで実現できることが古くから知られており、様々な物理現象の発現の舞台となってきた。一方21世紀に入ってからは、薄膜エピタキシー技術の発達や、グラフェンに代表される2次元物質の登場、さらにはトポロジカル絶縁体の発見などにより、様々な物質系で2次元電子系を比較的容易に実現できるようになり、単層高温超伝導や室温量子ホール効果などの驚くべき物性が次々と明らかになってきている。本研究では特に2次元物質に注目し、薄膜エピタキシー技術を利用した物質開発や、ファンデルワールス超構造における物性開拓などに取り組んでいる。これまでに、様々な2次元物質を一層ずつ layer-by-layer 成長させる技術を確認し、現在はそれらの超薄膜・超構造における新奇物性の開拓研究が進行中である。



ファンデルワールス超構造

## 主要論文

1. N. Yoshikawa, H. Suganuma, H. Matsuoka, Y. Tanaka, P. Hemme, M. Cazayous, Y. Gallais, M. Nakano, Y. Iwasa, and R. Shimano "Ultrafast switching to an insulating-like metastable state by amplitudon excitation of a charge density wave", *Nature Phys.*, 17, 909 (2021).
2. H. Matsuoka, S. E. Barnes, J. Ieda, S. Maekawa, M. S. Bahramy, B. K. Saika, Y. Takeda, H. Wadati, Y. Wang, S. Yoshida, K. Ishizaka, Y. Iwasa, and M. Nakano "Spin-orbit-induced Ising ferromagnetism at a van der Waals Interface", *Nano Lett.*, 21, 1807 (2021).
3. M. Nakano, Y. Wang, S. Yoshida, H. Matsuoka, Y. Majima, K. Ikeda, Y. Hirata, Y. Takeda, H. Wadati, Y. Kohama, Y. Ohigashi, M. Sakano, K. Ishizaka, and Y. Iwasa "Intrinsic 2D ferromagnetism in  $V_2Se_3$  epitaxial thin films", *Nano Lett.*, 19, 8806 (2019).
4. M. Nakano, Y. Wang, Y. Kashiwabara, H. Matsuoka, and Y. Iwasa "Layer-by-layer epitaxial growth of scalable  $WSe_2$  on sapphire by molecular-beam epitaxy", *Nano Lett.*, 17, 5595 (2017).
5. M. Nakano, K. Shibuya, D. Okuyama, T. Hatano, S. Ono, M. Kawasaki, Y. Iwasa, and Y. Tokura "Collective bulk carrier delocalization driven by electrostatic surface charge accumulation", *Nature*, 487, 459 (2012).

## ユニット紹介・概要

当ユニットでは、物質をわずか一層にまで薄くした際に発現する物性や機能の開拓に取り組む。特に2次元物質のエピタキシャル成長を通して、劈開が困難な物質の単層化や、天然には存在しない組成や構造を持つ新奇量子物質の人工合成を実現すると共に、電界効果ドーピングによる電子相制御と新奇デバイス機能の開拓に取り組む。さらに、異なる2次元物質を積層させたファンデルワールス超構造を構築し、電子の個々としての性質であるスピンやバレー、あるいは波動関数のトポロジーといった量子力学的な特徴と、電子の集団としての性質である超伝導や磁性などの強相関物性を融合させることで、単一物質では得られない物性や機能を創出する。

# トポロジカル量子物質研究ユニット

Topological Quantum Matter Research Unit



## HIRSCHBERGER Max

Ph.D.・ユニットリーダー  
maximilian.hirschberger@riken.jp

### 研究分野

物理学／材料科学

### キーワード

強相関電子系, 磁性, スキルミオン, スピン-軌道相互作用, 創発電磁気学, トポロジカル物質, フラストレート磁性体, ベリー位相物理

### 略歴

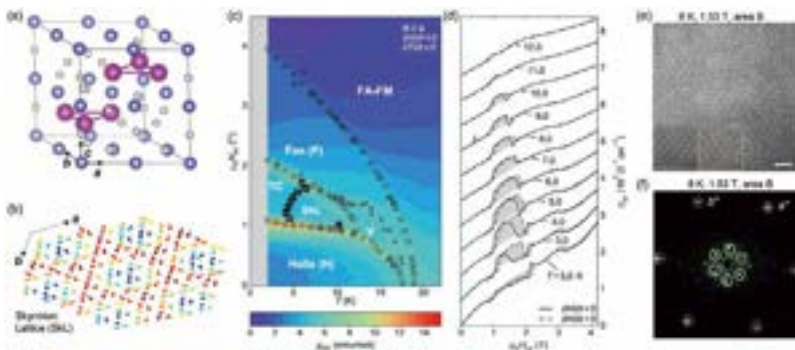
- 2011 ドイツ ミュンヘン工科大学物理学卒業
- 2017 米国 プリンストン大学物理学専攻 Ph.D. 取得
- 2017 理化学研究所 創発物性科学研究センター 特別研究員
- 2018 日本学術振興会・フンボルト財団 外国人特別研究員／理化学研究所 創発物性科学研究センター 訪問研究員
- 2019 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任講師
- 2019 理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム トポロジカル量子物質研究ユニット ユニットリーダー (現職)
- 2021 東京大学大学院工学系研究科物理学専攻 准教授 (現職)
- 2021 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任准教授 (現職)

### ユニット紹介・概要

当ユニットでは、磁気スキルミオンなど非共面的なスピン秩序と電子バンド構造による効果に着目して研究している。薄膜成長可能で、新しい保護された表面状態を実現する可能性のある強相関物質に特に注目する。手法としては、密度汎関数理論に基づいた物質探索、単結晶合成、超高精度の輸送現象測定などを行う。理研内外の研究者と緊密な共同研究を行い、量子ビーム散乱や実空間観察によって磁気構造を解明する。また、国内や欧米の強磁場施設を利用し、45 T (静磁場) もしくは100 T (パルス磁場) までの超強磁場中での物性を調べる。

## 中心対称性のあるブリージングカゴメ格子磁性体におけるスキルミオン

我々は、トポロジカルなスピン渦を生じるフラストレート磁性体を探索し、それらにおける巨大な創発現象を研究している。例えば、六方晶金属間化合物である  $Gd_2PdSi_3$  と  $Gd_3Ru_4Al_{12}$  において、RKKY 相互作用は格子の対称性を反映してフラストレートしている。実際に、非常に短い周期 ( $\lambda \sim 2-3$  nm) の非共面的スキルミオン格子を TEM によって観察した。また輸送特性において、巨大なトポロジカルホール効果を観測した。



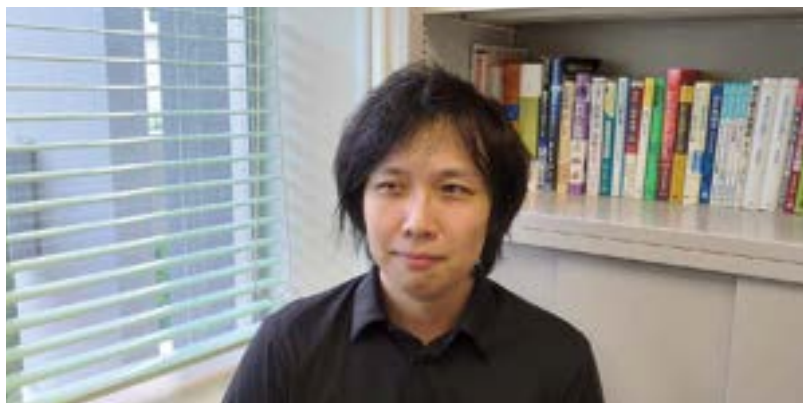
六方晶金属間化合物である  $Gd_3Ru_4Al_{12}$  中のスキルミオン。  
(a) ピンク色の球はブリージングカゴメ副格子の  $Gd^{3+}$  モーメントを表す。(b) スキルミオンのスピン構造。(c) 磁気相図。競合する相互作用のため、多くの磁気相が観測される。(d) 巨大なトポロジカルホール効果が観測される (グレーの網掛け部)。(e) スキルミオンの実空間像。(f) (e) のフーリエ変換。

### 主要論文

1. K. Kolincio, M. Hirschberger, J. Masell, S. Gao, A. Kikkawa, Y. Taguchi, T.-h. Arima, N. Nagaosa, and Y. Tokura, "Large Hall and Nernst responses from thermally induced spin chirality in a spin-trimer ferromagnet", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2023588118 (2021).
2. M. Hirschberger, L. Spitz, T. Nomoto, T. Kurumaji, S. Gao, J. Masell, T. Nakajima, A. Kikkawa, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, Y. Taguchi, R. Arita, T.-h. Arima, and Y. Tokura, "Topological Nernst Effect of the Two-Dimensional Skyrmion Lattice", *Phys. Rev. Lett.* 125, 076602 (2020).
3. M. Hirschberger, T. Nakajima, S. Gao, L. Peng, A. Kikkawa, T. Kurumaji, M. Kriener, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, K. Ohishi, Kakurai, Y. Taguchi, X. Yu, T.-h. Arima, and Y. Tokura "Skyrmion phase and competing magnetic orders on a breathing kagome lattice", *Nat. Commun.*, 10, 5831 (2019).
4. M. Hirschberger, S. Kushwaha, Z. Wang, Q. Gibson, S. Liang, C.A. Belvin, B.A. Bernevig, R.J. Cava, and N.P. Ong, "The chiral anomaly and thermopower of Weyl fermions in the half-Heusler  $GdPtBi$ ", *Nat. Mater.*, 15, 1161 (2016).
5. M. Hirschberger, R. Chisnell, Y.S. Lee, and N.P. Ong, "Thermal Hall effect of spin excitations in a kagome magnet", *Phys. Rev. Lett.*, 115, 106603 (2015).

# トポロジカル材料設計研究ユニット

Topological Materials Design Research Unit



平山 元昭 博士 (工学)・ユニットリーダー  
motoaki.hirayama@riken.jp

## 研究分野

物理学／材料科学

## キーワード

第一原理計算、理論物質設計、トポロジカル物質、マヨラナフェルミオン・パラフェルミオン、スピン-軌道相互作用

## 略歴

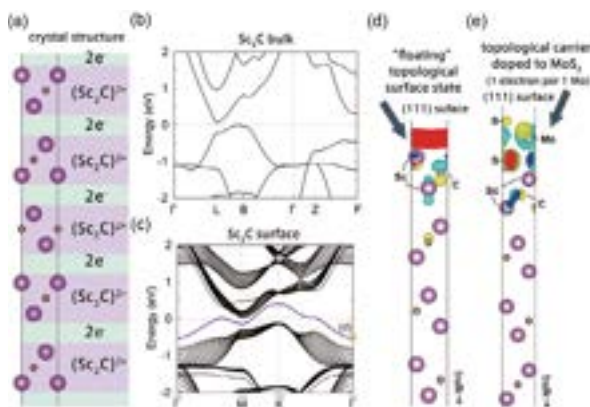
- 2013 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程修了
- 2013 産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 関連材料シミュレーショングループ 特別研究員
- 2015 東京工業大学 大学院理工学研究科 物性物理学専攻 特任助教
- 2017 理化学研究所 創発物性科学研究センター 計算物質科学研究チーム 研究員
- 2020 同 統合物性科学研究プログラム トポロジカル材料設計研究ユニット ユニットリーダー (現職)
- 2020 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任准教授 (現職)

## ユニット紹介・概要

当ユニットでは、現実物質に即した数値計算手法である第一原理計算を用いて、新奇物質とその物性の開拓を行う。特に電子のバンド構造における幾何学的性質に着目し、非自明な物性を発現するトポロジカル物質の探索に焦点を当て、その特異な電子状態の生む物性や応用を検討する。電子系としては超伝導状態なども対象とし、量子計算を見据えたマヨラナフェルミオンの創発を提案する。また、相関効果を第一原理的に取り扱う手法を開発し、強相関電子系や磁性材料系を含めた幅広い電子系の物質デザインを行う。当ユニットではさらに、電子化物などの化学・材料分野の物質も対象に含め、広い科学領域に跨る材料設計を行う。

## トポロジカル物質の新たな舞台としての電子化物

当ユニットでは、トポロジカル物質の新たな物質系の1つとして電子化物を提案した。電子化物とは、結晶中の空隙に電子  $e^-$  が入り込み、アニオンとして構造の安定化を担っている物質群で、小さな仕事関数を持つことから触媒等の分野で研究が進んでいる。例えば、層状物質  $Sc_2C$  (図 (a)) では、層と層の間の空隙に電子が入り込み、図 (b) のようにバンド絶縁性を示す。この  $[Sc_2C]^{2+}2e^-$  の電荷密度はアニオン電子  $2e^-$  のために  $Sc_2C$  層から大きくずれた層間の位置に広がっており、量子化された巨大な分極を有する幾何学的に非自明な系となっている。バルクのトポロジを反映し、 $Sc_2C$  表面では幾何学的に保護された金属状態が出現する (図 (c))。表面の金属状態は空隙起源のため、 $Sc_2C$  表面の上に宙に浮かんで出現する (図 (d))。この原子に局在していない電子雲は小さな仕事関数を持つため、 $Sc_2C$  を基板として用いることで、表面載せた物質に対して高密度の電子ドーピングを行うことが可能になる。例えば  $MoS_2$  に対しては  $Mo$  1 サイトあたり1電子のドーピングが可能となる (図 (e))。相対論的な量子相を含め、当ユニットでは様々なトポロジカル電子化物を発見しており、科学分野を横断したトポロジカル物性の開拓が期待される。



(a) トポロジカル電子化物  $[Sc_2C]^{2+}2e^-$  の結晶構造, (b)  $Sc_2C$  のバンド構造, (c)  $Sc_2C$  (111) 表面のバンド構造, (d) 宙に浮かんだトポロジカル表面状態, (e)  $MoS_2$  に注入されたトポロジカル電荷

## 主要論文

1. M. Hirayama, T. Tadano, Y. Nomura, and R. Arita "Materials design of dynamically stable  $d^9$  layered nickelates", *Phys. Rev. B* 101, 075107 (2020).
2. M. Hirayama, S. Matsuishi, H. Hosono, and S. Murakami, "Electrides as a New Platform of Topological Materials", *Phys. Rev. X*, 8, 031067 (2018).
3. M. Hirayama, R. Okugawa, T. Miyake, and S. Murakami, "Topological Dirac nodal lines and surface charges in fcc alkaline earth metals". *Nat. Commun.* 8, 14022 (2017).
4. M. Hirayama, R. Okugawa, S. Ishibashi, S. Murakami, and T. Miyake "Weyl Node and Spin Texture in Trigonal Tellurium and Selenium" *Phys. Rev. Lett.*, 114, 206401 (2015).





異常光起電力	創発デバイス研究チーム (岩佐)	23	高分子合成	創発機能高分子研究チーム (但馬)	25
位相差顕微鏡法	電子状態マイクロコピー研究チーム (于)	18	情報変換ソフトマター研究ユニット (宮島)		40
イメージング	強相関量子構造研究チーム (有馬)	11	コロイド量子ドット	創発超分子材料研究チーム (夫)	27
	創発現象観測技術研究チーム (進藤)	32			
液晶・高分子	ソフトマター物性研究チーム (荒岡)	28			
X線結晶構造解析	物質評価支援チーム (橋爪)	29	刺激応答材料	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20
X線散乱	強相関量子構造研究チーム (有馬)	11	創発生体関連ソフトマター研究チーム (石田)		22
エデルシュタイン効果	量子ナノ磁性研究チーム (大谷)	33	自己組織化	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20
エネルギー変換	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20	創発生体関連ソフトマター研究チーム (石田)		22
	創発生体工学材料研究チーム (伊藤)	26	創発機能高分子研究チーム (但馬)		25
			情報変換ソフトマター研究ユニット (宮島)		40
			創発分子集積研究ユニット (佐藤)		41
カーボンナノチューブ	量子効果デバイス研究チーム (石橋)	37	磁性	計算量子物性研究チーム (柚木)	14
界面電子	強相関理論研究グループ (永長)	7	強相関スピン研究チーム (古川)		17
界面電子構造	強相関量子伝導研究チーム (十倉)	10	トポロジカル量子物質研究ユニット (HIRSCHBERGER)		47
化学分析	物質評価支援チーム (橋爪)	29	磁束量子	創発現象観測技術研究チーム (進藤)	32
環境低負荷材料	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20	シフトカレント	強相関理論研究グループ (永長)	7
	創発生体関連ソフトマター研究チーム (石田)	22	シフトカレント/光電流分光	創発光物性研究チーム (小川)	19
凝縮系物理学	低次元輸送現象研究ユニット (Zhang)	43	磁壁	スピン物性理論研究チーム (多々良)	35
	トポロジカル量子現象研究ユニット (梁)	44	状態間遷移	創発超分子材料研究チーム (夫)	27
強相関酸化物	創発機能界面研究ユニット (中野)	46	ジョセフソン効果	低次元輸送現象研究ユニット (Zhang)	43
強相関電子系	強相関物性研究グループ (十倉)	6	試料評価	創発物性科学研究支援チーム (秋元)	36
	強相関物質研究グループ (田口)	9	進化分子工学	創発生体工学材料研究チーム (伊藤)	26
	強相関量子伝導研究チーム (十倉)	10	スキルミオン	強相関物性研究グループ (十倉)	6
	計算量子物性研究チーム (柚木)	14		強相関物質研究グループ (田口)	9
	計算物質科学研究チーム (有田)	15		強相関スピン研究チーム (古川)	17
	電子状態スペクトロスコーピー研究チーム (石坂)	16		トポロジカル量子物質研究ユニット (HIRSCHBERGER)	47
	強相関スピン研究チーム (古川)	17	スピン - 軌道相互作用	強相関物性研究グループ (十倉)	6
	創発光物性研究チーム (小川)	19		強相関量子伝導研究チーム (十倉)	10
	量子システム理論研究チーム (Loss)	34		量子システム理論研究チーム (Loss)	34
	動的創発物性研究ユニット (賀川)	39		スピン物性理論研究チーム (多々良)	35
	トポロジカル量子現象研究ユニット (梁)	44		トポロジカル量子物質研究ユニット (HIRSCHBERGER)	47
	創発分光学研究ユニット (高橋)	45		トポロジカル材料設計研究ユニット (平山)	48
	トポロジカル量子物質研究ユニット (HIRSCHBERGER)	47	スピン制御	量子機能システム研究グループ (樽茶)	30
計算物性物理学	計算量子物性研究チーム (柚木)	14	スピントロニクス	創発光物性研究チーム (小川)	19
結晶工学	創発分子集積研究ユニット (佐藤)	41		量子ナノ磁性研究チーム (大谷)	33
高温超伝導体	強相関量子伝導研究チーム (十倉)	10		スピン物性理論研究チーム (多々良)	35
	低次元輸送現象研究ユニット (Zhang)	43	スピンホール効果	強相関理論研究グループ (永長)	7
合成化学	創発分子機能研究チーム (瀧宮)	21		量子ナノ磁性研究チーム (大谷)	33
構造物性	強相関量子構造研究チーム (有馬)	11	スピン流	量子ナノ磁性研究チーム (大谷)	33
光電子分光	電子状態スペクトロスコーピー研究チーム (石坂)	16		スピン物性理論研究チーム (多々良)	35
光電変換材料	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20	スペクトロスコーピー	動的創発物性研究ユニット (賀川)	39
高分解能電子顕微鏡法	電子状態マイクロコピー研究チーム (于)	18			

生体模倣	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20	動的制御	創発超分子材料研究チーム (夫)	27
	創発生体関連ソフトマター研究チーム (石田)	22	トポロジカルエレクトロニクス	強相関界面研究グループ (川崎)	8
精密高分子合成	創発生体工学材料研究チーム (伊藤)	26	トポロジカル絶縁体	強相関物性研究グループ (十倉)	6
説明可能なAI	量子凝縮体研究チーム (上田)	31		強相関量子伝導研究チーム (十倉)	10
センサー	創発生体工学材料研究チーム (伊藤)	26		創発物性計測研究チーム (花栗)	12
走査型トンネル顕微鏡	創発物性計測研究チーム (花栗)	12		量子物性理論研究チーム (古崎)	13
走査型プローブ顕微鏡	動的創発物性研究ユニット (賀川)	39	トポロジカル超伝導	量子物性理論研究チーム (古崎)	13
相制御	動的創発物性研究ユニット (賀川)	39		量子効果デバイス研究チーム (石橋)	37
創発電磁気学	強相関理論研究グループ (永長)	7	トポロジカル物質	強相関界面研究グループ (川崎)	8
	トポロジカル量子物質研究ユニット(HIRSCHBERGER)	47		電子状態スペクトロスコーピー研究チーム (石坂)	16
ソフトマター物性測定	ソフトマター物性研究チーム (荒岡)	28		トポロジカル量子物質研究ユニット(HIRSCHBERGER)	47
ソフトマテリアル	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20		トポロジカル材料設計研究ユニット (平山)	48
	創発生体関連ソフトマター研究チーム (石田)	22	トポロジカル粒子	量子機能システム研究グループ (樽茶)	30
			トポロジカル量子物質	量子システム理論研究チーム (LOSS)	34
				計算物質機能研究ユニット (XU)	42
				トポロジカル量子現象研究ユニット (梁)	44
第一原理計算	計算物質科学研究チーム (有田)	15			
	計算物質機能研究ユニット (XU)	42			
	トポロジカル材料設計研究ユニット (平山)	48			
多孔質材料	創発分子集積研究ユニット (佐藤)	41	ナノ構造制御	創発機能高分子研究チーム (但馬)	25
単一電子制御	量子電子デバイス研究チーム (山本)	38	ナノ磁性	創発現象観測技術研究チーム (進藤)	32
中性子散乱	強相関量子構造研究チーム (有馬)	11		量子ナノ磁性研究チーム (大谷)	33
	強相関スピン研究チーム (古川)	17	ナノチューブ	創発デバイス研究チーム (岩佐)	23
超高速時間分解電子顕微鏡	電子状態スペクトロスコーピー研究チーム (石坂)	16	ナノデバイス	量子システム理論研究チーム (LOSS)	34
超高速 / 広帯域分光	創発光物性研究チーム (小川)	19		量子電子デバイス研究チーム (山本)	38
超高速分光	創発分光学研究ユニット (高橋)	45	ナノバイオテクノロジー	創発生体工学材料研究チーム (伊藤)	26
超伝導	強相関理論研究グループ (永長)	7		情報変換ソフトマター研究ユニット (宮島)	40
	強相関物質研究グループ (田口)	9	2次元電子系	量子電子デバイス研究チーム (山本)	38
	創発物性計測研究チーム (花栗)	12	2次元物質	創発デバイス研究チーム (岩佐)	23
	計算量子物性研究チーム (柚木)	14		情報変換ソフトマター研究ユニット (宮島)	40
	電子状態スペクトロスコーピー研究チーム (石坂)	16		創発機能界面研究ユニット (中野)	46
	強相関スピン研究チーム (古川)	17	熱電効果	強相関物質研究グループ (田口)	9
	創発デバイス研究チーム (岩佐)	23		創発デバイス研究チーム (岩佐)	23
低次元超伝導体	低次元輸送現象研究ユニット (Zhang)	43		計算物質機能研究ユニット (XU)	42
テラヘルツ分光	創発分光学研究ユニット (高橋)	45		トポロジカル量子現象研究ユニット (梁)	44
電界効果デバイス	創発機能界面研究ユニット (中野)	46			
電気磁気効果	強相関理論研究グループ (永長)	7			
電子機能材料	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20	$\pi$ 電子系化合物	創発分子機能研究チーム (瀧宮)	21
電子顕微鏡	物質評価支援チーム (橋爪)	29	薄膜・界面	強相関界面研究グループ (川崎)	8
	創発現象観測技術研究チーム (進藤)	32		計算物質機能研究ユニット (XU)	42
電子状態	電子状態マイクロスコーピー研究チーム (于)	18		創発機能界面研究ユニット (中野)	46
電子線回折	強相関量子構造研究チーム (有馬)	11	半導体ナノワイヤ	量子効果デバイス研究チーム (石橋)	37
電子線ホログラフィー	創発現象観測技術研究チーム (進藤)	32	半導体ナノ粒子	創発超分子材料研究チーム (夫)	27
電子相関	量子物性理論研究チーム (古崎)	13	光格子	量子凝縮体研究チーム (上田)	31

光物性	ソフトマター物性研究チーム (荒岡)	28	有機非線形光学	ソフトマター物性研究チーム (荒岡)	28
微細加工	創発物性科学研究支援チーム (秋元)	36	有機・無機分子ハイブリッド	創発超分子材料研究チーム (夫)	27
非自明光電効果	強相関界面研究グループ (川崎)	8	-----		
非自明ホール効果	強相関界面研究グループ (川崎)	8	量子計算	量子機能システム研究グループ (樽茶)	30
非相反効果	強相関理論研究グループ (永長)	7	量子コヒーレンス	量子電子デバイス研究チーム (山本)	38
	創発分光学研究ユニット (高橋)	45	量子シミュレーション	量子凝縮体研究チーム (上田)	31
非相反現象	創発デバイス研究チーム (岩佐)	23	量子情報デバイス	量子効果デバイス研究チーム (石橋)	37
表面・界面	創発分子集積研究ユニット (佐藤)	41	量子相関	量子凝縮体研究チーム (上田)	31
ファンデルワールスエピタキシー	創発機能界面研究ユニット (中野)	46		量子電子デバイス研究チーム (山本)	38
	低次元輸送現象研究ユニット (Zhang)	43	量子ドット	創発デバイス研究チーム (岩佐)	23
フラストレート磁性体	量子物性理論研究チーム (古崎)	13		量子機能システム研究グループ (樽茶)	30
	トポロジカル量子物質研究ユニット (HIRSCHBERGER)	47		量子効果デバイス研究チーム (石橋)	37
分子設計	創発ソフトマター機能研究グループ (相田)	20	量子ビット	量子機能システム研究グループ (樽茶)	30
	情報変換ソフトマター研究ユニット (宮島)	40	利用者教育	創発物性科学研究支援チーム (秋元)	36
分子ネットワーク	創発超分子材料研究チーム (夫)	27	理論物質設計	計算物質科学研究チーム (有田)	15
分析電子顕微鏡法	電子状態マイクロスコピー研究チーム (于)	18		計算物質機能研究ユニット (XU)	42
ベリー位相物理	強相関物性研究グループ (十倉)	6		トポロジカル材料設計研究ユニット (平山)	48
	トポロジカル量子現象研究ユニット (梁)	44	励起状態	創発超分子材料研究チーム (夫)	27
	トポロジカル量子物質研究ユニット (HIRSCHBERGER)	47	冷却原子	量子凝縮体研究チーム (上田)	31
ボース・アインシュタイン凝縮	量子凝縮体研究チーム (上田)	31	ローレンツ顕微鏡法	電子状態マイクロスコピー研究チーム (于)	18
-----				創発現象観測技術研究チーム (進藤)	32
マグノン-フォノンカップリング	量子ナノ磁性研究チーム (大谷)	33			
マヨラナフェルミオン・パラフェルミオン	量子システム理論研究チーム (LOSS)	34			
	トポロジカル材料設計研究ユニット (平山)	48			
マルチフェロイクス	強相関物性研究グループ (十倉)	6			
	強相関物質研究グループ (田口)	9			
	創発分光学研究ユニット (高橋)	45			
メタマテリアル	スピン物性理論研究チーム (多々良)	35			
モノポール	スピン物性理論研究チーム (多々良)	35			
有機エレクトロニクス	創発ソフトシステム研究チーム (染谷)	24			
	創発機能高分子研究チーム (但馬)	25			
有機強誘電体	ソフトマター物性研究チーム (荒岡)	28			
有機センサ	創発ソフトシステム研究チーム (染谷)	24			
有機電界効果トランジスタ	創発分子機能研究チーム (瀧宮)	21			
	創発ソフトシステム研究チーム (染谷)	24			
有機熱電材料	創発分子機能研究チーム (瀧宮)	21			
有機薄膜太陽電池	創発分子機能研究チーム (瀧宮)	21			
	創発ソフトシステム研究チーム (染谷)	24			
	創発機能高分子研究チーム (但馬)	25			
有機発光デバイス	創発ソフトシステム研究チーム (染谷)	24			
有機半導体	創発分子機能研究チーム (瀧宮)	21			
	創発超分子材料研究チーム (夫)	27			





