

恩賜 日本学士院賞 受賞者 十倉好紀



略歴	生年	専攻学科学目
	昭和二十九年三月	物性物理学
	昭和五十一年三月	東京大学工学部物理工学科卒業
	同 五六年三月	東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
	同 五六年三月	工学博士
	同 六一年七月	東京大学理学部助教
	平成 五年七月	工業技術院・産業技術融合領域研究所・アトムテクノロジー研究体グループリーダー
		(併任、平成一四年二月まで)
	同 六年一月	東京大学大学院理学系研究科教授 (平成七年三月まで)
	同 六年四月	東京大学大学院工学系研究科教授 (現在に至る)
	同 一三年四月	(独) 産業技術総合研究所強相関電子技術研究センター長 (併任、平成二〇年三月まで)
	同 一三年一〇月	科学技術振興事業団創造科学技術推進事業「スピン超構造」プロジェクト総括責任者
		(併任、平成一九年二月まで)

- 同 一八年一〇月 (独) 科学技術振興機構創造科学技術推進事業「マルチフェロイクス」プロジェクト統括責任者(併任、平成二二年三月まで)
- 同 一九年一〇月 (独) 理化学研究所フロンティア研究システム(二〇年四月より基幹研究所) 交差関連物性科学研究グループディレクター(併任、平成二五年三月まで)
- 同 二〇年 四月 (独) 産業技術総合研究所フェロー(併任、現在に至る)
- 同 二二年 四月 (独) 理化学研究所基幹研究所物質創成研究領域長(併任、平成二五年三月まで)
- 同 二二年 四月 (独) 理化学研究所基幹研究所物強相関量子科学研究グループディレクター(併任、平成二五年三月まで)
- 同 二二年 四月 東京大学量子相エレクトロニクス研究センター長(併任、現在に至る)
- 同 二四年 四月 (独) 理化学研究所基幹研究所創発機能物性研究グループディレクター(併任、平成二五年三月まで)
- 同 二五年 四月 (独) 理化学研究所創発物性科学研究センター長(現在に至る)

工学博士十倉好紀氏の「強相関電子材料の物性研究」に対する授賞審査要旨

十倉好紀氏は、エネルギーの散逸を極限まで抑えつつ高速の巨大電子応答を示す材料開発の原理を、強相関電子系と呼ばれる物性物理学の概念と物質群に求め、この強相関電子材料物理学分野を創生・主導してきた。

強相関電子とは、固体中の多数の電子が、相互にはたらくクーロン力によって互いの運動を強く抑制している状態を指す。このような系では、個々の要素（ここでは電子、スピン、原子など）の単なる集合体としては計り知れない、新規で巨大な応答・物性・機能が発現するが、これは「創発性」という言葉で表現される。強相関電子系は創発性発現の場の典型であり、しばしば、せめぎ合う電子相の間で相転移とよばれる、状態の転換を起こす。その相転移近傍では、外部からの入力によってそれが秘匿する驚くべき新電子機能―高温超伝導、超巨大磁気抵抗、巨大電気磁気効果など―が巨大応答となって出現する。この創発現象を示す系は、近年の物性科学の中心的な追求課題となるとともに、革新的電子材料としての応用が始

まっており、またそこで得られた物理学的知見は、革新的な電子機能操作の基礎を与えたと考えられる。十倉氏は、強相関電子物質の開発と新しい電子機能の開拓に関して、独創的な成果を次々と挙げ、文字通りこの量子物性科学分野を創成し、世界をリードしてきた。

十倉氏は、最初の強相関電子系の業績として、高温超伝導体の一般的な物質則（いわゆる十倉ルール）を提唱し、またその設計指針に従い、自ら電子ドーピング高温超伝導体を発見した。これは高温超伝導の電子―ホール対称性を実証したもので、今なお高温超伝導研究におけるもっとも重要な発見のひとつである。同氏は、これを契機に、強相関電子を具現する舞台としての、広範な物質群、特に遷移金属酸化物の物質開発とその新しい電子物性・機能の開拓に着手した。この着想は、上述したモット転移のごく近傍の異常金属相が、高温超伝導や超巨大磁気抵抗（磁場によって電気抵抗が何桁も変化する現象）などの驚くべき電子物理現象の宝庫であると喝破したに他ならない。その例として、同氏は、マンガン酸化物などの超巨大磁気抵抗物質の開発とその電子論的機構の解明を果たした。これは、電子が強相関効果によって、ナノメートルスケールで秩序化、整列化した状態を、外部磁場で一瞬に融解せしめ、金属化（電子液体化）するということである。このような電子相の競合に基づく巨

大応答発現の原理は、十倉氏の研究以後、広く知られるようになり、この原理に基づく多くの新物質・機能開発が他の材料系でも始まっている。同氏は、マンガン・銅・バナジウム酸化物などを対象として、磁場だけではなく、光励起やX線、電場によってもこの絶縁体から金属への転移、あるいは強磁性体への転移がフェムト秒スケールの高速で誘起できることを実証した。特に、電場による金属絶縁体転移の研究は、今日、遷移金属酸化物において次世代の高速高密度不揮発メモリー素子として盛んに研究されており、実用化に近い ReRAM (resistive random access memory、電場印加による抵抗変化をメモリとする素子) の先駆的研究として古典的な位地を確立している。

さらに強相関酸化物に関しては、十倉グループによって、新たな学術研究分野を創生する大きな発見がなされた。マルチフェロイックス現象―つまり強誘電性と磁性秩序の共存―である。マックスウエル電磁気学は、時間変化する磁場と電場が独立ではないことを教えるが、これを固体中の電磁気現象として、電場で磁性を、磁場で電気分極を制御することは、そうたやすくはなく、従来、極微の応答が知られるのみであった。十倉氏は固体中の電気磁気結合についても、電子のスピンや軌道の秩序化と相競合を使って、巨大応答を実現したのである。この現象は、相対論的スピン軌道相互作用に

よるものであることが明らかにされ、固体の秩序を使った応答増幅の設計指針は、エネルギー散逸(電力損失)を極端に抑えた情報操作、たとえば電場による磁化ベクトルの制御など、を可能にする革新的なエレクトロニクス原理・材料の開発につながるものである。実際、同氏は理論グループと共同で、いわゆる強磁性体の磁化に由来する巨大なホール効果(異常ホール効果)が非散逸性のスピン流によることを明確に実証し、また最近では「絶縁体の磁気励起自体のホール効果」や「数百テスラにおよぶ仮想磁場をつくるナノスケールのスピン渦(スキルミオン)」の発見など、将来のスピンエレクトロニクスに革新を与えうる概念を、物質設計・材料開発までを視野に入れたスタンスで発信し続けている。

このように、十倉氏は、「個別の業績がひとつの新しい役立つ材料を作った」というレベルをはるかに越えて、強相関電子という物理学的パラダイムに基づいて、エネルギー機能応用にも重要な、新しい豊穡の材料科学技術を創始した。

主要な論文目録

〔一〕高温超伝導体の物質条件・物質設計

- 1-1. J.B. Torrance, Y. Tokura, A.I. Nazzari, A. Bezinge, T.C. Huang, and S.S.P. Parkin: "Anomalous disappearance of high-Tc superconductivity at high hole concentration in metallic $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_2$ ", *Phys. Rev. Lett.* **61**, 1127

- (1988).
- 1-2. Y. Tokura, J.B. Torrance, T.C. Huang, and A.I. Nazzari: "Broader perspective on the high-temperature superconducting YBaCu₃O₇ system — the real role of the oxygen-content", *Phys. Rev. B* **38**, 7156 (1988).
- 1-3. Y. Tokura, H. Takagi, and S. Uchida: "A superconducting copper-oxide compound with electrons as the charge-carriers", *Nature* **337**, 345 (1989).
- 1-4. Y. Tokura and T. Arima: "New classification method for layered copper-oxide compounds and its application to design of new high-T_c superconductors", *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, 2388 (1990).
- [2] 銅酸鹽層状化合物の超伝導性 — 金属-絶縁体境界線 —
- 2-1. T. Arima, Y. Tokura, and J.B. Torrance: "Variation of optical gaps in perovskite-type 3d transition-metal oxides", *Phys. Rev. B* **48**, 17006 (1993).
- 2-2. Y. Tokura, Y. Taguchi, Y. Okada, Y. Fujishima, T. Arima, K. Kumagai, and Y. Iye: "Filling dependence of electronic properties on the verge of metal Mott-insulator transitions in Sr_{1-x}La_xTiO₃", *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2126 (1993).
- 2-3. M. Imada, A. Fujimori, and Y. Tokura: "Metal-insulator transitions", *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1039 (1998).
- 2-4. Y. Tokura and N. Nagaosa: "Orbital physics in transition-metal oxides", *Science* **288**, 462 (2000).
- [3] 巨大磁気抵抗効果化合物の物質理解 — 物性研究
- 3-1. A. Urushihara, Y. Morimoto, T. Arima, A. Asanitsu, G. Kido, and Y. Tokura: "Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in La_{1-x}Sr_xMnO₃", *Phys. Rev. B* **51**, 14103 (1995).
- 3-2. Y. Tomioka, A. Asanitsu, Y. Morimoto, H. Kuwahara, and Y. Tokura: "Collapse of a Charge-Ordered State under a Magnetic Field in Pr_{1-x}Sr_xMnO₃", *Phys. Rev. Lett.* **74**, 5108 (1995).
- 3-3. H. Kuwahara, Y. Tomioka, A. Asanitsu, Y. Morimoto, and Y. Tokura: "A First-Order Phase-Transition Induced by a Magnetic-Field", *Science* **270**, 961-963 (1995).
- 3-4. Y. Okimoto, T. Katsufuji, T. Ishikawa, A. Urushihara, T. Arima, and Y. Tokura: "Anomalous Variation of Optical Spectra with Spin Polarization in Double-Exchange Ferromagnet: La_{1-x}Sr_xMnO₃", *Phys. Rev. Lett.* **75**, 109 (1995).
- 3-5. Y. Morimoto, A. Asanitsu, H. Kuwahara, and Y. Tokura: "Giant magnetoresistance of manganese oxides with a layered perovskite structure", *Nature* **380**, 141 (1996).
- 3-6. Y. Tomioka, A. Asanitsu, H. Kuwahara, Y. Morimoto, and Y. Tokura: "Magnetic-field-induced metal-insulator phenomena in Pr_{1-x}Ca_xMnO₃ with controlled charge-ordering instability", *Phys. Rev. B* **53**, R1689 (1996).
- 3-7. K.L. Kobayashi, T. Kimura, H. Sawada, K. Terakura, and Y. Tokura: "Room-temperature magnetoresistance in an oxide material with an ordered double-perovskite structure", *Nature* **395**, 677 (1998).
- 3-8. Y. Tokura: "Critical features of colossal magnetoresistive manganites", *Rep. Prog. Phys.* **69**, 797 (2006).
- [4] 光磁阻効果の巨磁気抵抗効果
- 4-1. S. Koshihara, Y. Tokura, K. Takeda, and T. Kodai: "Reversible photoinduced phase-transitions in single-crystals of polydiacetylenes", *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1148 (1992).
- 4-2. K. Miyano, T. Tanka, Y. Tomioka, and Y. Tokura: "Photoinduced insulator-to-metal transition in a perovskite manganite", *Phys. Rev. Lett.* **78**, 4257 (1997).
- 4-3. H. Kishida, H. Matsuzaki, H. Okamoto, T. Manabe, M. Yamashita, Y. Taguchi, and Y. Tokura: "Gigantic optical nonlinearity in one-dimensional Mott-Hubbard insulators", *Nature* **405**, 929 (2000).
- [5] 銅酸鹽層状化合物の超伝導性

- 5-1. T. Kimura, Y. Tomioka, H. Kuwahara, A. Asamitsu, M. Tamura, and Y. Tokura: "Interplane tunneling magnetoresistance in a layered manganite crystal", *Science* **274**, 1698 (1996).
- 5-2. A. Asamitsu, Y. Tomioka, H. Kuwahara, and Y. Tokura: "Current switching of resistive states in magnetoresistive manganites", *Nature* **388**, 50 (1997).
- 5-3. H. Yamada, Y. Ogawa, Y. Ishii, H. Sato, M. Kawasaki, H. Akoh, and Y. Tokura: "Engineered interface of magnetic oxides", *Science* **305**, 646 (2004).
- 5-4. A. Sawa, T. Fujii, M. Kawasaki, and Y. Tokura: "Hysteretic current-voltage characteristics and resistance switching at a rectifying Ti/Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃ interface", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 4073 (2004).
- [6] トルナンロニクス 巨大電気抵抗効果の探索
6-1. T. Kimura, T. Goto, H. Shinani, K. Ishizaka, T. Arima, and Y. Tokura: "Magnetic control of ferroelectric polarization", *Nature* **426**, 55 (2003).
- 6-2. T. Goto, T. Kimura, G. Lawes, A. P. Ramirez, and Y. Tokura: "Ferroelectricity and giant magnetocapacitance in perovskite rare-earth manganites", *Phys. Rev. Lett.* **92**, 257201 (2004).
- 6-3. Y. Yamasaki, S. Miyasaka, Y. Kaneko, J.P. He, T. Arima, and Y. Tokura: "Magnetic reversal of the ferroelectric polarization in a multiferroic spinel oxide", *Phys. Rev. Lett.* **96**, 207204 (2006).
- 6-4. S. Ishiwata, Y. Taguchi, H. Murakawa, Y. Onose, and Y. Tokura: "Low-Magnetic-Field Control of Electric Polarization Vector in a Helimagnet", *Science* **319**, 1643 (2008).
- 6-5. Y. Tokura and S. Seki: "Multiferroics with Spiral Spin Orders", *Adv. Mater.* **22** (14): 1554 (2010).
- [7] 新スピントロンクス基礎：異常ホール効果およびポロニカル量子現象
7-1. Y. Taguchi, Y. Ohhara, H. Yoshizawa, N. Nagosa, and Y. Tokura: "Spin chirality, Berry phase, and anomalous Hall Effect in a frustrated ferromagnet", *Science* **291**, 2573 (2001).
- 7-2. Z. Fang, N. Nagosa, K. S. Takahashi, A. Asamitsu, R. Mathieu, T. Ogasawara, H. Yamada, M. Kawasaki, Y. Tokura, and K. Terakura: "The Anomalous Hall Effect and Magnetic Monopoles in Momentum Space", *Science* **302**, 92 (2003).
- 7-3. X. Z. Yu, Y. Onose, N. Kanazawa, J. H. Park, J. H. Han, Y. Matsui, N. Nagosa, and Y. Tokura: "Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal", *Nature* **465**, 901 (2010).
- 7-4. X. Z. Yu, N. Kanazawa, Y. Onose, K. Kimoto, W. Z. Zhang, S. Ishiwata, Y. Matsui, and Y. Tokura: "Near room-temperature formation of a skyrmion crystal in thin-films of the helimagnet FeGe", *Nat. Mater.* **10**, 106 (2011).
- 7-5. S. Seki, X. Z. Yu, S. Ishiwata, and Y. Tokura: "Observation of Skyrmions in a Multiferroic Material", *Science* **336**, 198 (2012).