

強相関電子材料研究事始めの頃

ー高温超伝導体・超巨大磁気抵抗・マルチフェロイックスー

十倉 好紀*

旧 産業技術融合領域研究所 アトムテクノロジー研究体
産業技術総合研究所 強相関電子技術研究センター

* 現在 産総研名誉フェロー・東大特別荣誉教授・理研理事長特別補佐

[要旨]

1993年から工技院の産業技術融合領域研究所(融合研)にあったアトムテクノロジー研究体(JRCAT)で、そして2001年からは産総研強相関電子技術研究センターにおいて、超巨大磁気抵抗物質、マルチフェロイックスなどの強相関電子系酸化物材料の探索・結晶合成と巨大物性機能探索の研究に邁進した。その15年の間はずっと、私は東大との併任であり、次第に大きくなっていった研究グループ・研究センターに、数名の併任大学教授・准教授と民間からの出向研究員も招聘して、文字通り産官学共同の体制で基礎的な研究を行い、強相関電子材料の学理構築を行っていた。

1. 私と工技院・産総研との関わり：融合研-JRCAT、ERATO、CERC

オングストロームテクノロジー研究機構(ATP)という聞きなれない技術研究組合から、工技院で展開する新しい産官学連携研究組織への参加を打診されたのは、1993年の春ごろだったろうか。私自身は数か月前に大きな手術をしたが、もう大丈夫かとわかったところで、ERATOというJSTの個人研究プロジェクトの総括候補者にも挙げられていて、今後の新しい研究に強い意欲をもち始めていた時だった。神田のATP事務所に呼んでいただいて、話をさせていただいた(後から思えば面接試験だったかとも思うが)。のちのアトムテクノロジー研究体(JRCAT)のリーダーであった、丸山瑛一さん(故人)、田中一宜さん、寺倉清之さん(私は尊敬するこれらの先達の方々を普段から「先生」としか呼ばないが、ここは工技院の慣例で「さん」づけにさせていただく)が待ち構えていらした。現在にいたるまで世界を席卷するナノテクノロジー研究の先駆けとなったJRCATではあったが、当時はまだその名称も確定していなかったし、私自身の研究構想がそもそもアトムテクノロジーに合致するのにかさえ全く自信がなかった。ただ、当時、高温超伝導研究の発展としての「強相関電子科学技術」の研究構想をプロポーサルとして文書にしていたのだが、それを読んだ田中さん(当時、すでにご高名は耳にしていたが、まったく個人的な面識がなかった)から、ATP事務所において「あまたの東大教授でもこんなすばらしい研究構想を書ける人はいるだろうか。」と褒めていただいたことは、一生忘れられない感激であった。この産官学の集中研究

方式の基礎研究プロジェクト（10年250億円）を立ち上げることが、当時として（また現在でさえ）、いかほどの重要な意義があり、そしてリーダーとしてどれほどの強い意思と実行力を必要としたかは、当時の若輩の私（38歳、東大・物理・助教授）には知る由もなかったが[1]。

JRCATの工技院での受け皿は、融合研だったので、私も東大兼務のままで工技院の融合研に所属して、研究グループを発足させた。初期のころは、工技院からの研究者1名、博士研究員4名、ATPメンバー企業からの出向研究員2名という陣容だったが、年間の予算額も含めて、当時「頭脳の棺桶」と呼ばれた大学から来た新米PIにとっては、まったく夢のように「裕福な」環境だった。もっとも、当時は「融合研（ゆうごうけん）」は「優遇研」と読むのだと工技院内でいわれていたことを後に知ったが。

JRCATが終了する2001年に工技院から産総研に衣替えした時に、JRCATでの実績をもとに、7年時限の新たな研究センター、強相関電子技術研究センター（CERC）を提案し認められた。旧電総研から赤穂博司さんに副センター長として参加いただき、橘浩昭さん（旧融合研）に加えて、新たに大学からも永長直人（東大）、高木英典（東大）、岡本博（東大）、川崎雅司（当時東北大）、のちに長谷川達生（当時北大）の各氏をグループリーダーとして招聘して、これにERATO（JST）「十倉スピソ超構造プロジェクト」を加え、それなりの研究規模を確保した。研究経営など何も気にせず、のびのびとやらせて頂いたJRCAT時代とは異なり、CERCでは産総研内でのセンター長としてそれなりの苦労はあったが、しかし、新たな産総研の研究者仲間も多く加わり、また大学では不可能な大きな研究支援を頂いて、充実した7年間を過ごすことができた。CERCは2007年度をもって終了したため、センターの研究グループは解散し、メンバーの多くは、産総研の各研究部門に移籍して、その後も活躍をいただいている。私自身は、ほぼCERC終了と同期して、お誘いを受けて理研に移り、しばらくの準備期間をおいて、2013年に、理研に創発物性科学研究センター（CEMS）という物性科学を中心とする新しい研究センターを発足させ、現在に至っている（センター長は11年間務めたあと、この春に退任した）。このセンター発足の際にも、またその後も、強相関電子技術、量子情報技術に関するAIST-RIKENの共同研究について、かつてのJRCAT・CERCの先輩、同僚の方々（今はAISTの幹部の方々も含めて）から色々のご支援を頂いた。

私自身は、この春ちょうど、古希を迎えた。40歳前から、14年間にわたって、ほぼ毎週一泊二日で筑波に通い続け、当日は夜遅くまで研究員の人たちと遅い晩飯を研究室でともにしながら議論をかわしていたのだが、今から思えば、その期間が私の研究リーダーとしての発展期だったのだろうと思う。ここでは研究の方向性を定めた折々の着想とその顛末を思い出せる範囲のメモとして記したい。以下2, 3, 4節で述べる仕事の実際の内容は、読みやすい形（のつもり）で、長編の解説論文のなかにも残している[2,3,4,5]。

2. 高温超伝導体から強相関電子材料への展開

融合研JRCATが実質的に立ち上がり、私自身が研究グループでの研究を開始した1993

年頃は、まだ、銅酸化物の高温超伝導の歴史的な研究フィーバーが続いていた。関連する新高温超伝導体の発見・開発研究こそ少し落ち着いた様子だったが、その機構をめぐっては、延々と(ある意味では現在にいたるまで)論争と関連する物性研究が続いていた。立場の違いはあるが、高温超伝導のクーパー対は、3d 電子スピンの反強磁性相互作用に由来するスピン揺らぎあるいはスピン重項の生成によることが確からしく、d 波の対称性をもつことも確立しつつあった。銅酸化物超伝導体はいわゆるペロブスカイト構造とよばれる物質群の類縁構造をもつが、鉄属遷移金属 (3d 電子系) のペロブスカイト型物質はほとんどの場合が、反強磁性絶縁体である。これは、3d 電子どうしが強いクーロン反発力によって、各原子サイト上に凍り付いた状態 (強相関絶縁体あるいはモット絶縁体と呼ばれる) にあるためである。高温超伝導体も例外ではなく、伝導の舞台である Cu-O 面を挟み込む形の原子層 (ブロック層と名付けた) での異なる価数のイオンの置換によって、Cu 原子あたりの 3d 電子数を整数 (モット絶縁体では 1) からずらすような、ドーピング操作 (バンドフィリング操作) が超伝導 (あるいは金属相) 発現に不可欠である。すなわち、高温超伝導は、絶縁体からバンドフィリング制御によって辛うじて伝導体になった物質の基底状態であったわけで、これからさらにホールドーピングや電子ドーピングを続けると、常伝導体での抵抗率はどんどん下がっていくが、逆に高温超伝導は消失していく。このようなモット絶縁体からドーピングによって金属が出現した状態は、電子間のクーロン相互作用が強い状態 (強相関電子状態) にあり、磁性と伝導が強く結合した異常な金属状態が出現しやすいことが予想できた。しかし、当時、高温超伝導体以外にこのようなバンドフィリング制御によるモット転移の研究はまだほとんどなかったように思う。

3d 電子系では、ペロブスカイト構造 AMO_3 (M は Ti から Cu までの遷移金属原子) が最も安定で、しかも A サイトは主にアルカリ土類イオン (Ca, Sr, Ba などの 2 価イオン) と Y, 希土類イオン (La, Nd などの 3 価イオン) を自由に混ぜる (混晶をつくる) ことができるため、バンドフィリングの制御も可能である。高温超伝導体を出す結晶場に置かれた Cu^{2+} 状態と違って、多くの遷移金属はスピン自由度だけでなく、電子軌道の縮退や分裂が絡む特徴 (軌道自由度) があるため、特にモット転移近傍のバンドフィリング (ドーピング) 領域では、多くの異常かつ興味深い磁性や電子物性が発現しそうである。これを念頭に、ペロブスカイト AMO_3 と層状ペロブスカイト (擬 2 次元系) A_2MO_4 を Ti から Cu までに渡って、すべての単結晶を作って、磁性、伝導性、光物性などのあらゆる物性を調べつくす、という目標を立てたわけだが、これが最初に述べた JRCAT で研究構想書に書いた中身であった。「金属と絶縁体のはざままで起こる異常物性の発見」を目指した訳 (算段はあった) だが、ペロブスカイトは予想以上に豊穡の海であることに間もなく気付いた。

最初のころは、 $M=Ti, V$ のペロブスカイト $LaTiO_3$ や $LaVO_3$ などの反強磁性モット絶縁体に、La サイトを Sr で置換 (フィリング制御) して、絶縁体から金属に転移 (モット転移) させてその臨界的な電子状態を調べた。これは、 Ti^{3+} のように $S=1/2$ の量子スピン系では、銅酸化物系のように、モット転移に伴い、高温超伝導が出るかもしれないと、山っ気もあっ

てのことだった。そのモット転移のふるまいは、臨界域で電子の有効質量が発散するという振る舞いが見られ、こちらの方こそが本来のフィリング制御モット転移の標準的な振る舞いであることが分かり、むしろ高温超伝導銅酸化物の「異常さ」を浮き彫りにすることとなった。さらに、 V^{3+} の系では、予想はしていたのだが、3 d 電子の軌道縮退（同じエネルギー状態に複数の軌道状態が存在する状態）があり、これらの系では、電子の軌道自由度とスピンと電荷の自由度の絡み合いをあらわに考慮する「軌道物理学」が必要であることが明らかになった。これらの研究もあって、その後の3 d、4 d 電子系の遷移金属酸化物の量子物性を語る上では不可欠の多くの基礎概念が明確になったわけで、現在に至るまで、強相関電子酸化物材料機能の探究に有用な基盤になっている。[2]

3. 超巨大磁気抵抗と抵抗変化メモリ (ReRAM) 材料

さて、以上のような一連の酸化物の中でも、特に系統的で詳細な物質開拓を行ったのが、いわゆる超巨大磁気抵抗(colossal magnetoresistance、略して CMR)マンガン酸化物である。この物質が示す強磁性については、とくにホールドープされたペロブスカイト結晶(La,Ca)MnO₃ などでは、古くから 2 重交換相互作用の名で知られており、初期には Anderson-Hasegawa や de Genne など、固体物理学の泰斗たちの有名な理論が知られていた。しかし、私どもの目論見は、例えば LaMnO₃ が反強磁性モット絶縁体であることからわかるように、強い電子相関の効果が、フィリング(ドーピング)制御とバンド幅(電子のトランスファー効果)の関数として、また強磁性一反強磁性の相転移と結合して、どのようなスピン-電荷-軌道結合物性が現れるかということであった。方針は、バンド幅を制御するために、ペロブスカイト格子の立方晶からのずれを精密に制御する化学的圧力効果を利用するために、La サイト(ペロブスカイトのA サイト)を種々のイオン半径をもつ希土類イオンで置換してゆき、それぞれの系でフィリング制御(2 価イオン Ca,Sr,Ba のドーピング)を行い、そしてこれらのすべての物質系についてフローティングゾーン法を用いて良質単結晶を育成し、その磁気抵抗などの物性と電子構造(光、光電子分光)と磁気構造(中性子散乱)を調べ尽くすというものであった。

このプロジェクトを融合研 J R C A T で始めてすぐに、驚きの結果が現れた。ある日のミーティングで、当時ポスドクであった富岡泰秀さん(現、産総研)が、(La,Sr) の A サイトをイオン半径のより小さい(Pr,Ca) で置き換えた結晶は、最低温まで、絶縁体のままなのだが、そこに数テスラの磁場をかけると、抵抗が数桁も落ちて、強磁性金属状態が出現した、というのである。これは単に Pr イオンなどの 4f 電子の問題ではなく、ペロブスカイト Mn-O ネットワークに起こるわずかな変形による電子パラメータの変化が、このような劇的な巨大磁気抵抗(CMR)効果が起こるのだということをすぐに確信した。「これだけで、5 年間はメシが喰えるな。」と内心思った。すぐに、JRCAT の若い同僚研究員とより系統的な物質開発と広範な物性研究を開始した。Mn ペロブスカイト系では、電子(その自由度である、電荷とスピンと軌道)が周期的に整列した絶縁状態が、磁場印加をはじめとして、フィリン

グや圧力の変化、さらに光照射や電流刺激によっても、電荷・軌道秩序の融解を起こし、競合する強磁性金属状態に転移する現象であることが明らかになった。つまり、種々の入力に応じて、伝導状態(絶縁体-金属)や磁性(反強磁性体-強磁性)や光物性に劇的な応答を惹起することができる。「これはまるで錬金術だな」、と悦んでいたのだが、光で絶縁体-金属転移を起こすというのが当時の私の夢の一つだったこともある。理論計算(JRCATには強力な寺倉グループがあった)、中性子・放射光X線散乱、光電子分光、透過電顕、超高速分光も含めて、国内外の多くの研究グループとも共同研究を行い、単に磁気伝導物性にとどまらない多彩な物性研究が進展していった[3]。当時は、すでに高温超伝導研究フィーバーのお蔭で、電子物性科学の研究においても、物性理論・電子状態計算も含めて広範な研究手法を用いて総合的に展開する(総力戦)という現代の研究方法論が確立し始めた時だったのである。

JRCAT(融合研)プロジェクトが終了したのちも、強相関電子技術研究センター(CERC)においても引き続き、CMR酸化材料については、トンネル磁気抵抗効果や高速光誘起強磁性転移などのスピントロニクス機能の開発研究を続けたが、意外なところが新しい発展の芽が出たのが、CMR酸化物単結晶での電流誘起の絶縁体-金属転移の発見だった。これは、電流刺激によって、電荷・軌道整列の絶縁体が強磁性金属に転移する現象だが、これは高速の電流パルス刺激においても有効で、電荷・軌道整列の融解現象にはヒステリシスが伴うため、短期記憶機能も発現する。当初は、この電流スイッチングがスピン-軌道-電荷秩序の崩壊と外部磁場に依存することの新規性と機構に大きな関心を抱いたのだが、米国のグループが同じ材料系の薄膜で顕著なスイッチング特性や不揮発メモリ特性を報告したこと、そしてIBMの高温超伝導発見者の一人、ベドノルツ博士もペロブカイトチタン酸化物でも同様の特性を報告したことから、遷移金属酸化物での抵抗変化メモリ(所謂ReRAM)材料研究が世界的な規模で進展した。CERCにおいても、澤彰仁さんや井上公さんやパナソニックから出向していた小田川明弘さんらの若手(当時)が中心に電流誘起抵抗変化メモリの研究を推進した。抵抗変化メモリ効果の機構は、当初のペロブスカイト酸化物で観測されたバルクでの電流誘起型絶縁体-金属相転移のような単純なモデルではなく、多くの場合、酸素イオンの移動を伴うフィラメント伝導パス生成の履歴現象も重要である。しかし酸素イオンの変位もフィリング変化による局所的なモット転移を引き起こすことから、電子の強相関効果が伝導特性のスイッチングには本質的なものと私は考えている。

CERCの後半期には、JRCATの折に同僚であった秋永広幸さん(当時産総研ナノテクノロジー部門)が中心となって、シャープからの出向の方々も含めた抵抗変化メモリのプロジェクト研究が展開された。そこでは、世の大勢と同様、むしろ単純な遷移金属酸化物(ただし、バルク状態ではモット絶縁体)をベースとしたデバイスの試作が行われた。私が産総研を離れたあとの2010年代に入ると、低電流駆動で消費電力が少なく、セル面積が小さく(6F²)、読み出し時間も10ナノ秒程度と高速、という特徴をもつReRAMの実用化が、各社で図られた。2011年にはパナソニックによるReRAMの量産化というニュースを聴いて、当時、

大変嬉しく思ったのを思い出す。その後も現在に至るまで ReRAM 関連の様々なニュースを耳にするが、私には、生き馬の目を抜くようなメモリー業界の動向や展望は全くわからない。

抵抗変化メモリー材料は、本質的に memristive な特性を持つ。メモリスタ(memristor)とは、通過した電荷を記憶し、それに伴って抵抗が変化する受動素子を指し、抵抗、キャパシタ、インダクタに次ぐ「第4の回路素子」と呼ばれる。抵抗変化メモリー材料に基づくメモリスタはこの特性を生かして、脳型計算(neuromorphic computing)への応用が盛んに議論されている。特に、リザーバーコンピューティングにおける物理的実装としての物理的リザーバーの有力候補であり、この観点からは、抵抗変化メモリー材料としてのスピン-電荷-軌道結合系に特有な非線形・短期記憶特性を示す複雑系強相関材料は、さらに新しい物質設計・材料開発の可能性が大きいと私は考えている。

4. マルチフェロイックスと巨大電気磁気効果

JRCAT(融合研)から CERC に切り替わる 2000 年の頃から、強磁性と強誘電性共存する物質群(マルチフェロイックス、当時はこの jargon は定着していなかったが)に興味を持っていた。強相関モット絶縁体は、磁性秩序(反強磁性や強磁性)を伴うことが多いが、通常のバンド絶縁体(半導体)とは機構が全く異なるが、電荷ギャップがある絶縁体には変わらないので、状況に応じて強誘電体が存在しても不思議ではないと思っていた。実際、研究を開始した当初、強誘電体に磁性を付与した物質の解説論文があるのを見つけはしたが、詰まるところ、誘電分極と磁化との有効な結合がなければ、有用な機能-巨大電気磁気効果-は期待できないわけで、まったく未開未踏の舞台であると確信した。普通の電子材料では、電場で電気分極を反転し、磁場で磁化を反転するのだが、マルチフェロイックスでは、対照的に、磁場で電気分極を反転し、電場(電流ではない)で磁化を反転するという効果を期待するのである。電場による磁化反転が自在に可能になれば、消費電力が劇的に減少する不揮発性磁気メモリも夢ではない。研究の手始めとして、強誘電体ではないが、結晶に電気分極がビルト・インされた polar な強磁性体(あるいはフェリ磁性体)での電気磁気効果(電場/磁場による磁性/分極の変調)を調べたが、これでも、従来は明確には意識されなかった多くの物性機能の発見があった。たとえば、三つ(A,B,C)の異なるペロブスカイト酸化物の数原子層を A-B-C-A-B-C で積み重ねた時、積層方向に実効的な分極が生じているので、そのうちの1つ以上の原子層や界面で強磁性が発現するのであれば、これはすなわちマルチフェロイックスとなる。この系では、光学領域での相対論効果(スピン-軌道相互作用)によって電気磁気効果が生じ、特有の非線形光学効果(磁化誘起第二高調波発生)、光非相反効果(光クローキング)、さらには面内は導電性の系であっても電流誘起磁化反転(スピン-軌道トルク効果)を現出する。これらの効果を CERC では物質界面での磁性検出や特性評価にも広く応用した研究を行った。

モット絶縁体でのスピン秩序自身が強誘電性を必然的に惹起するのであれば、電気分極と(一般化された)磁化には完全な結合が現れることになる。この典型的な例が JRCAT-

CERC で研究をしていた CMR マンガン酸化物の母体結晶 (TbMnO₃ など) で現れることを、木村剛さん (当時東大十倉研講師、元 JRCAT 研究員) らが発見した (2003 年 Nature 誌)。すなわち、特定の磁性相にだけ、強誘電性が発現し、磁場印加によって強誘電性が、また電場印加によって磁性構造が大きく変調されたのである。そのすぐ後には、永長直人さん (CERC、東大併任) 達が、サイクロイド型の (ネール磁壁的な) らせん磁性が存在すれば、スピン-軌道相互作用のもとで必ず強誘電分極が現れることを理論的に証明してみせた。一旦、基本原理が分かれば、それを具現化する物質開発競争が世界中で起こり、これ以降マルチフェロイックスは世界的にも大きな潮流となって現在に至っている [4]。今では、らせん磁性を有するヘキサフェライト結晶で、室温付近で磁場による分極反転、電場による磁化反転が実現している。しかし、これらを超低消費電力の素子に応用するには、室温付近での安定的な現象発現などに課題を残しており、15 年後の今も研究を継続中である。

また、マルチフェロイックスではないが、同じく変わり種の強誘電体として、ドナー-アクセプター型の有機電荷移動錯体や水素結合ネットワークを有するプロトン移動型 (プロトン強相関) の分子性強誘電体には、その発見と量子物性には若い頃よりずっと興味があった。前者の TTF-CA などの物質群は、JRCAT-CERC を通じ、堀内佐智夫さん (現、産総研) や熊井玲児さん (現 KEK 物構研) らととともに、価数変動にともなう強誘電相転移を実際に確認した [5]。しかし、後者のプロトン強相関型については、その候補物質のリストを以前に論文発表していたが、私自身は簡単には行くまいと思っていた。ところが、堀内佐智夫さんが、そのいくつかは温度変化による強誘電相転移を示さなくても (高温では、有機分子が分解してしまう)、常温、常圧でも電界を加えれば分極反転することを見出した。(まるで「コロブスの卵」である。) その後、堀内さん自身が次々と新しい有機分子性強誘電体を合成、発見していった。有機エレクトロニクスがますます発展しつつある現在、この素晴らしい室温有機分子性強誘電体が実用材料として陽の目を見ることを強く願っている。

5. 後日談と現在

7 年のセンター年限の CERC が終了したのは、2007 年度末であった。2001 年に CERC が立ち上がったのは産総研の独法化による組織改革の折であり、その後、毎年の業績評価では最後までトップの評価を頂き続けたが、最後の年の経産省の原課担当の方からの評価意見は「産総研を卒業して、東大に帰ったらどうか。」という厳しいものであった。ただ、当時の吉川理事長を始め、産総研の経営陣には、JRCAT の系譜に繋がるこの産官学連携の基礎研究プロジェクトとしての CERC に、最後まで温かいご支援をいただいたことは、今なお感謝の念に堪えない。マルチフェロイックスや有機強誘電体の研究を展開するなどの新規の研究計画は、当時始まったばかりだったが、その発展の一部は産総研の同僚に委ねる一方、私自身も永長直人、川崎雅司さん (元 C E R C グループリーダー) たちと理研での新しい研究組織の立ち上げに向かった。幸い、新しい ERATO プロジェクト (十倉マルチフェロイックスプロジェクト 2006-2011) や FIRST プログラム (2009-2013) の支援もあり、新しい

研究センター、創発物性科学研究センター (CEMS)、を立ち上げた (2013 年)。これは理研では初めての物性物理-超分子化学-量子情報エレクトロニクスなどの物性科学を包含する戦略研究センターであった。特に量子情報エレクトロニクス領域では、当時はデコヒーレンスの問題から下火となっていた量子計算関連研究でも、その研究リーダーに、特に国内で考えうる最強のメンバーを新たに理研に招聘したのだが、量子計算研究関連部門は 3 年ほど前に、量子技術ビッグバンで CEMS から理研量子コンピュータセンター (RQC) としてスピン・アウトした。これに限らず、産総研と理研の量子技術関連ではアライアンスを形成して、互恵的に研究を進めてきた。今後の一層の協力関係と実質的かつ戦略的な協働が進むことを強く期待している。

さて、研究の方の後日談である。2005 年のトポロジカル絶縁体の提唱を契機として、物性物理学の最前線は、強相関とトポロジーの概念が交差する分野にあるとあってよい。たとえばトポロジカル絶縁体に磁性を付与した磁性トポロジカル絶縁体は、ゼロ磁場においても量子ホール効果(量子異常ホール効果)を示す。この効果の発見の一番乗りは逃したが、理研 CEMS のグループが、産総研の物理計測標準部門の岡崎雄馬さん、金子晋久さんたちに協力して、ゼロ磁場での量子標準抵抗 (8 桁精度) を実現した (2022 年 Nature Physics 発表) のは、上記の産総研一理研連携研究の賜物である。また、産総研で研究展開を開始したマルチフェロイックスなどのらせん磁性の物性科学は、その後トポロジカル粒子の磁気スキルミオンの観測実証につながり、さらに拡張マルチフェロイックスとしてのトポロジカル磁性半導体・半金属の創製など、新しい多くの創発電磁物性を生みつつあり、将来の超低消費電力エレクトロニクスの実現に貢献できる可能性もあると考えている。

ちなみに、スキルミオン科学に関しては、偶々最近、現在の理研の同僚 PI である于秀珍さん (CERC 内に設置した ERATO プロジェクトの元技術員・研究員) と共同で、筑波にも縁の深い江崎玲於奈賞を受賞する栄に浴した。その折に、JRCAT の先輩でもあった金山敏彦さん (元、産総研副理事長) から、「AIST 研究秘話」への寄稿をお誘いいただいたのが、この稿である。私が、曲がりなりにも共同研究組織のオーガナイザーとして働けるようになったのは、すべては工技院での JRCAT に学び、産総研 CERC という小さい道場で現場監督として鍛えられたおかげである。今回、金山さんからせっかく頂いた機会なので、当時の折々の研究開発上の同僚研究員の皆さんの奮闘とささやかな成功をエピソードとして述べたかったのだが。私自身ははまだハウスキーピングに明け暮れる毎日で、古い資料の終活整理もままならず、ちょっとした来し方さえ振り返る余裕もなく、ただ自分の脳裏にかすかに化学物質として沈殿した残渣だけを頼りにした、記憶違いも多い駄文となったと思うが、ご容赦願う次第である。

参考文献

[1] 田中一宜、「国立研究所外史/ドキュメンタリー-国家プロジェクト～真の産官学連携をめざした人々」静岡学術出版 (2016)。

- [2] M. Imada, A. Fujimori, and Y. Tokura, “Metal-insulator transitions”, Rev. Mod. Phys. **70**, 1039-1263(1998).
- [3] Tokura, “Critical features of colossal magnetoresistive manganites”, Rep. Prog. Phys. **69**, 797-851(2006).
- [4] Y. Tokura, Y. Seki, and N. Nagaosa, “Multiferroics of spin origin”, Rep. Prog. Phys. **77**, 076501 (2014).
- [5] S. Horiuchi and Y. Tokura, “Organic ferroelectrics”, Nature Materials, **7**, 357-366 (2008).

著者略歴

1954年 兵庫県生まれ
1976年 東大工学部物理工学科卒業、 1981年 同大学院博士課程卒業（工学博士）
1986年 東大理学部物理学教室 助教授、1994年 同 教授
1993年 工技院融合研 JRCAT グループリーダー
1995年 東京大学大学院工学系研究科教授、
2001年 産総研強相関電子技術研究センター（CERC）センター長
2007年 理研基幹研究所 グループディレクター
2008年 産総研フェロー、のち名誉フェロー
2013年 理研創発物性科学研究センター（CEMS）センター長
2017年-（現在） 東大卓越教授、2019年-（現在） 東大特別荣誉教授
2024年-（現在） 理研理事長特別補佐

主な受賞歴

1990年 仁科記念賞：「電子型高温超伝導体の発見」
1990年 日本IBM科学賞：「高温超伝導物質の一般則の発見」
1991年 Bernd Matthias Prize：「高温超伝導体の普遍性の実証」
1998年 日産科学賞：「酸化物巨大磁気抵抗の発見と機構」
2002年 朝日賞：「強相関電子物質の研究」
2003年 紫綬褒章：「物性物理学研究功績」
2005年 James C. McGroddy Prize for New Materials：「新しいスピン電荷秩序をもつ遷移金属酸化物の創製」
2011年 藤原賞：「物質中の巨大な電気磁気応答の創成」
2012年 IUPAP Magnetism Award and Néel Medal：「磁気科学への顕著な貢献」
2013年 恩賜賞・日本学士院賞：「強相関電子材料の物性研究」
2014年 Honorary Doctor at Uppsala University
2014年 スウェーデン王立科学アカデミー 外国人会員
2014年 本多記念賞：「遷移金属酸化物における強相関電子機能の開拓」

2019 年 Humboldt Research Award

2020 年 文化功勞者

2022 年 日本学士院会員

2023 年 英国王立協会外国人会員

2023 年 江崎玲於奈賞：「スピン渦結晶の直接観察とその物性の研究」

原稿受付：令和6年5月12日