

はじめに

強誘電体という名前は半導体や強磁性体(磁石)ほど広く知られていない。しかし、われわれが日常生活で使用している電子機器では、強誘電体の高い誘電率や圧電性を利用した数多くの素子が使用されている。現代技術を影で支えている、目立たないが重要な役割を担っている物質である。一方、凝縮系科学の基礎分野においては、電子が主役を担っている他の分野に比較して、強誘電体は結晶格子という電子を支える舞台が大きな役割を果たしていることから、比較的地味な分野であった。しかしながらこの15年間に於いて、大きな転換期を迎えている。強誘電体の電気分極自身が、波動関数の幾何学的な位相と密接に関連していることが明らかになり、古典的な描像から解放されて大きな発展をとげた。また強誘電性と磁性秩序が共存しているマルチフェロイック物質では、電子のスピンが強誘電性を直接誘起する現象も発見され、基礎科学としての興味だけではなく、磁場が強誘電性を制御し、電場が磁性を変えるクロス相関技術の現実性が高くなっている。さらにフェロイック物質に必然的に発生する分域、特にその境界(分域壁)でさまざまなエキゾチックな物性が次々に発見・観察されるようになった。これはピエゾ走査顕微鏡や電子顕微鏡における収差補正技術の発展、第1原理計算の進展によるところ大である。今まで何か理解できない現象が発生すると分域のせいにする風潮があったが、これをミクロに定量的に解釈することが可能となっている。いや、むしろ、この分域壁で起こる現象を積極的に利用しようとする機運が世界的に高まりつつある。今われわれは Domain boundary science & technology と呼ばれている新しいナノ科学の夜明けを迎えていると言ってよいであろう。

強誘電体はその発見から100年近い歴史をもつ物質である。多くの碩学たちがその機構の解明に取り組み、大きな発展をとげた。今後、新たな発想を得るには、このパイオニアたちの研究をもう一度振り返ってみるのも重要なことではないかと考える。本教科書はこのような立場に立って、すでに定着している古典的な知識を辿りながら、一方で新しい動向をできるだけ盛り込むことを志した。また筆者自身は強誘電体の実験的研究に取り組んできたので、その経験に基づいて、実験の記述に比重を置くように努めた。これが今までにすでに出版されている強誘電体関係の優れた出版物の中で、本書のアイデンティティを主張できる点であると考えている。

強誘電体という言葉(ferroelectrics)は、その発見の前から知られていた強磁性体

(ferromagnetics)に由来する。それが示す D - E 履歴曲線が鉄を代表とする強磁性体の M - H 履歴曲線と類似していることからきている。Ferroelectric という言葉を最初に用いたのは、量子力学の波動方程式で有名なシュレーディンガー (Schrödinger) であり、彼の 1912 年の論文に初めて登場する*1。

強誘電性が発見された年より大分前の論文であるが、シュレーディンガーは誘電体で知られている古典的なクラウジウス-モソッティの関係式から、強磁性体に類似した現象が起こることを予想した。“Ferro” は鉄に由来する言葉であるが、鉄は強誘電性を示さないで違和感を感じるかもしれない。一方、日本語訳の強誘電体を初めて使ったのは三宅静男氏といわれている。これも強磁性体に由来するが、こちらの方が自然に受け入れられるであろう。

初めて発見された強誘電体はロッシェル塩であり、チェコスロヴァキアの Valasek が 1921 年に発見した。しかし初めての強誘電体がロッシェル塩であったということは強誘電体研究の進展にとってあまり幸福なことではなかったようである。というのは、ロッシェル塩は 2 つの温度に挟まれた領域で強誘電性を示す特異な強誘電体であるからである。またその構造も複雑で理論の発展に大きな壁となった。その後、1935 年にスイスのグループが水素結合をもつ強誘電体リン酸 2 水素カリ KH_2PO_4 を発見した。これは比較的簡単な構造をもち、重水素置換によってその強誘電転移温度が大きく変わることを実験、理論両面から興味をもたれ、数多くの研究がなされた。強誘電体の分野を大きく発展させたのは、第 2 次世界大戦中に米国、ロシア、それから日本の研究者によって独立に発見されたチタン酸バリウム BaTiO_3 であろう。この物質は単位胞の中にわずか 1 分子すなわち 5 個の原子しか含んでおらず、構造も単純である。この酸化物は室温で安定であり、Ba や Ti のサイトにさまざまな遷移金属原子を置換できる。これらはペロブスカイト酸化物として分類され、強誘電性のみならず反強誘電性、磁性、超伝導性などさまざまな物性を示す、固体物理の中心となる物質の 1 つである。強誘電体のプロトタイプとなる物質でこの本でもたびたび取り上げられるであろう。図 P.1 に代表的な強誘電体の発見と強誘電体研究の発展をまとめて示す。

本書を書くにあたりいろいろな方から助言をいただきました。ここに深甚なる感謝の意を表します。勝藤拓郎早稲田大学教授にはこの本の執筆を勧めていただき、また原稿を読んで適切なコメントをいただきました。近桂一郎早稲田大学名誉教授からは

*1 石橋善弘氏のご教示による。

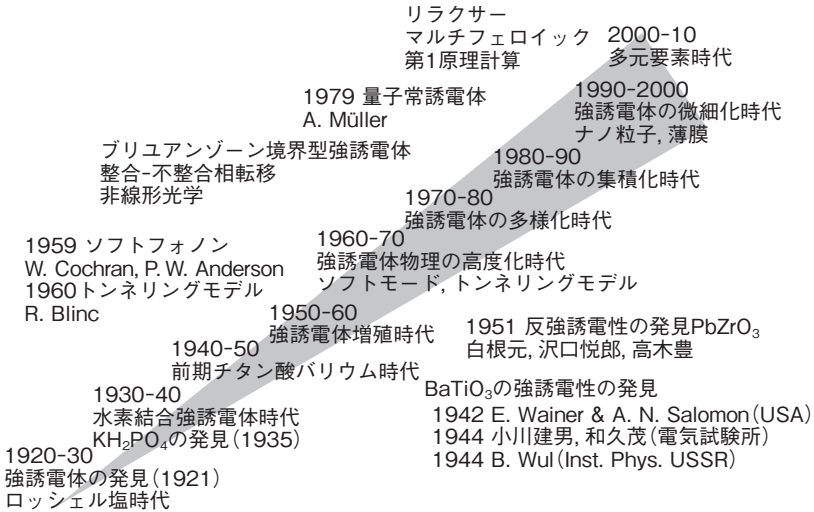


図 P.1 強誘電体の発見と強誘電体研究の歴史。

電気磁気効果, 磁性対称性に関して詳細な説明と文献をいただき, 山田安定大阪大学名誉教授, 石橋善弘名古屋大学名誉教授からも貴重な知識の提供をいただいています。Jean-Michel Kiat パリ大学サクレ校 SPMS 研究所所長, Jacques Bouillot サヴォア大学名誉教授, Boris Strukov モスクワ大学教授, Mike Glazer オックスフォード大学名誉教授とは 30 年以上にわたる共同研究を通じた議論によって強誘電体の理解を深めることができました。福永守博士には図表の作成などを手伝ってもらいました。第 9 章, 1 の強誘電体の電氣的測定には同博士のアイデアが盛り込まれています。その他にも筆者の研究室や学会においての若い研究者との議論がこの本を書く上での大きな糧となりました。最後になりますが, 内田老鶴園内田学社長には忍耐強く原稿の完成を待っていただき, 出版の立場からいろいろな助言をいただきました。改めて感謝いたします。

2016 年 5 月

上江洲由晃