

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                               |    |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 博士（工学）                                                                                                        | 氏名 | 吉田 傑 |
| 論文題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Structure-Property Correlations in Complex Oxides with Broken Inversion Symmetry<br>(反転対称性の破れた複酸化物における構造物性相関) |    |      |
| (論文内容の要旨)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                               |    |      |
| <p>本論文は、ペロブスカイト型ならびに類似の構造を持つ酸化物結晶を対象に、従来の 2 次ヤーン - テラー効果に基づく変位型強誘電性あるいは圧電性とは大きく異なる機構である酸素八面体回転に起因したハイブリッド間接型機構で強誘電性や圧電性を生じる物質を新たに合成し、個々の結晶相の構造相転移とそれに伴う誘電性の変化を実験的に明らかにするとともに、特定の誘電性を導く微視的な機構を理論的に解明して、結晶構造と誘電性の相関関係を導くことを目的としたもので、序章、終章および 4 章で構成されている。</p> <p>序章では、研究の背景として結晶構造の対称性、特に反転対称性の有無と誘電性との関係を述べるとともに反転対称性および極性構造の立場から結晶構造（空間群）を整理した上で、強誘電体に関わる基礎的な事項を概観している。強誘電性が現れる機構を直接型、間接型、ハイブリッド間接型に分類し、それぞれの特徴と互いの相違点を、ランダウ理論に基づく自由エネルギーの分極と変位による展開を例示することによって説明している。特に本研究で扱うハイブリッド間接型機構に関して、層状ペロブスカイト型構造を対象に、金属イオンを中心に持つ酸素八面体の回転がもたらしうる反転対称性の破れの機構を結晶構造と照らし合わせながら述べている。さらに、ハイブリッド間接型機構に基づいて強誘電性や圧電性を示す新たなペロブスカイト関連酸化物を見だし、結晶構造と誘電性の詳細な相関関係を明らかにすることの学術的な意義を説明している。</p> <p>第 1 章では、ルドルスデン - ポッパー相の一種（<math>n=2</math> 相、すなわち、組成式はペロブスカイト型構造における A サイトカチオンと B サイトカチオンに対して <math>A_3B_2O_7</math> と表現される）である <math>Sr_3Zr_2O_7</math> を新たに合成し、放射光 X 線回折、中性子回折、光第二高調波発生測定に基づいて結晶構造ならびに対称性の温度依存性と相転移の挙動を明らかにするとともに、誘電分極の電場依存性を実測して巨視的な誘電性を評価している。その結果、<math>Sr_3Zr_2O_7</math> は室温において空間群 <math>A2_1am</math> に属する構造を持つ強誘電体であること、温度上昇に伴い 750 K 付近で一次相転移を起こし、高温では反転対称性を持つ <math>Pnab</math> 構造に転移すること、低温相から高温相への相転移は <math>c</math> 軸を回転軸とする酸素八面体の回転が同位相から逆位相に変化することに対応していることを明らかにしている。また、密度汎関数法に基づくフォノン分散の計算から、最も対称性の良い <math>I4/mmm</math> 構造はさまざまな波数においてフォノンのソフト化を生じ、最終的に <math>A2_1am</math> 構造が最も安定な相となることを見いだすとともに、全エネルギーの計算から、<math>X_3^-</math>モードおよび <math>X_2^+</math>モードが存在する場合においてのみ、<math>\Gamma_5^-</math>モードがゼロではない位置でエネルギーの極小かつ最小が現れること、すなわち、<math>A2_1am</math> 構造がハイブリッド間接型機構で強誘電性を生じていることを明らかにしている。さらに、同様の実験と理論的考察に基づき、<math>Pnab</math> 構造は単純な常誘電体ではなく、ハイブリッド間接型機構で導かれる反強誘電体であるとの提案を行っている。</p> <p>第 2 章では、第 1 章と同様の <math>n=2</math> のルドルスデン - ポッパー相として <math>Sr_3Sn_2O_7</math> およびその Ca 系との固溶体 <math>(Sr_{1-x}Ca_x)_3Sn_2O_7</math> を対象に、放射光 X 線回折、中性子回折、光第</p> |                                                                                                               |    |      |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |        |    |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----|------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 博士（工学） | 氏名 | 吉田 傑 |
| <p>二高調波発生測定、<math>^{119}\text{Sn}</math> メスバウアー分光により結晶構造と相転移の挙動を調べている。その結果、<math>x=0\sim 0.2</math> の相はいずれも室温において <math>A2_1am</math> 構造を持つ強誘電体であること、高温では一次相転移を経て <math>Pnab</math> 構造に変化すること、相転移温度は <math>\text{Ca}</math> の添加量に伴い単調に上昇することを見いだすとともに、<math>\text{Sn}</math> は+4 の酸化状態で存在し、<math>d^{10}</math> 状態であるため 2 次ヤーン-テラー効果が強誘電性に寄与する可能性は小さいことを確認している。同時に、密度汎関数法に基づくフォノン分散と全エネルギーの計算により、<math>A2_1am</math> 構造がハイブリッド間接型機構で生じることを明らかにしている。さらに、本章で対象とした <math>(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_3\text{Sn}_2\text{O}_7</math> に加え、これまでに誘電性が調べられている <math>n=2</math> のルドルスデン-ポッパー相 (<math>\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7</math>、<math>\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7</math> など) のキュリー温度（一次相転移温度）が、ペロブスカイト型構造を構成するカチオンと酸化物イオンのイオン半径に基づく単純な幾何学的因子であるトレランスファクターと非常に良い相関を持つことを見いだしている。また、誘電分極とトレランスファクターの関係を考慮することにより、<math>n=2</math> のルドルスデン-ポッパー相のキュリー温度が誘電分極に比例するという関係を提唱している。</p> <p>第 3 章では、カチオン欠陥が規則的に配列したペロブスカイト型構造をとる <math>\text{Y}_{1/3}\text{TaO}_3</math> を対象に、結晶構造の温度依存性と相転移の挙動を放射光 X 線回折、中性子回折、光第二高調波発生測定、示差走査熱量測定により調べ、室温において強誘電体となる <math>Pb2_1m</math> 構造をとること、595 K から 745 K までの広いヒステリシスを伴う一次相転移を経て高温では常誘電体相である <math>P4/mmm</math> 構造に変化することを見いだしている。誘電分極の電場依存性の測定から見積もられた自発分極は室温において <math>0.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2</math> であり、酸素八面体回転に起因するハイブリッド間接型機構で強誘電体となる他の酸化物の自発分極と比べて 1.5~4 倍ほど大きいことを明らかにし、互いに逆方向を向く電気双極子の打ち消し合いが、規則的に配列したカチオン欠陥の存在によって緩和される結果、大きな自発分極が得られるとの考察を行っている。また、この化合物が 750 K 以上で示す常誘電体相が、巨視的には <math>P4/mmm</math> 構造をとるものの、局所的には <math>\text{TaO}_6</math> 八面体回転が起こり、その振幅が結晶格子とは異なる周期の変調構造（インコメンシュレート構造）を生じるとともに、局所的に生じる電気双極子は結晶構造全体にわたって平均化され誘電分極はゼロになることを見いだしている。</p> <p>第 4 章では、<math>n=1</math> のルドルスデン-ポッパー相である <math>\text{ARTiO}_4</math> (<math>A</math> は <math>\text{Na}</math>、<math>\text{K}</math>、<math>\text{Rb}</math>、<math>\text{Ag}</math> であり、<math>R</math> は希土類元素) を対象に、結晶構造、格子定数、対称性の温度変化、ならびに相転移の挙動を実験的に調べるとともに、電子構造と格子ダイナミクスを密度汎関数法により考察して、これらの化合物が室温で圧電体となることを明らかにしている。この系では、希土類元素のイオン半径が大きくなるほど <math>a</math> 軸と <math>b</math> 軸が短くなること、また、<math>\text{Ag}</math> 系では <math>a</math> 軸と <math>b</math> 軸に沿って負の熱膨張が観察されることを見いだしている。前者については、<math>\text{TiO}_6</math> の回転に加えてこの八面体の変形が生じ、希土類イオンが大きくなるにつれて回転が抑えられると同時に変形が大きくなり、<math>c</math> 軸方向には引っ張られ、<math>a</math> 軸と <math>b</math> 軸方向には圧縮が生じることを明らかにしている。<math>\text{Ag}</math> 系では <math>\text{Ag-O-Ti}</math> の共有結合を通じて 2 次ヤーン-テラー効果が働き、<math>\text{TiO}_6</math> が極度に変形する結果、<math>a</math> 軸と <math>b</math> 軸方向に負の熱膨張が現れるという機構を提唱している。</p> <p>終章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p> |        |    |      |