

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04986

研究課題名（和文）ペロブスカイト型Fe酸化物を用いたp型およびn型高温熱電材料の開発

研究課題名（英文）Development of p-type and n-type high temperature thermoelectric materials using perovskite-type Fe oxides

研究代表者

中津川 博（Nakatsugawa, Hiroshi）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40303086

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年、熱電材料は、未利用廃熱を回収できる熱電変換材料として注目を集めている。しかしながら、同一母相或いは同一結晶構造で高い性能を示す酸化物材料が未だ見つかっていない。そこで、p型およびn型の高い性能を示す可能性のあるペロブスカイトFe酸化物に着目した。本研究は、Fe³⁺のスピンの状態を制御し中間スピンFe³⁺が多数を占めるペロブスカイトFe酸化物Nd_{1-x}Sr_xFeO_{3-δ}（0.1 < x < 0.9）を作製し、低温から高温までの結晶構造と磁気構造を同定して、従来の報告よりも高いp型およびn型熱電特性を示す可能性を明らかにした。更なる高い熱電特性を示す酸化物材料を探索することが今後の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を更に発展させることにより、今後、p型およびn型の高い性能を示すペロブスカイトFe酸化物が発見されれば、高温・酸化環境下での熱電発電のエネルギー変換効率向上に貢献するだけでなく、喫緊の課題である持続可能社会の促進をもたらす材料の実用化に、新しい展開がもたらされるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Recently, thermoelectric materials have attracted attention as thermoelectric conversion materials that can recover unused waste heat. However, no oxide material has yet been found that exhibits high performance with the same matrix or crystal structure. Therefore, we focused on perovskite Fe oxides, which have the potential to exhibit high p- and n-type performance. In this study, a perovskite Fe oxide Nd_{1-x}Sr_xFeO_{3-δ}（0.1 < x < 0.9）, in which the spin state of Fe³⁺ is controlled and intermediate spin Fe³⁺ is predominant, was prepared, and its crystal and magnetic structures from low to high temperatures were identified, revealing the possibility of higher p-type and n-type thermoelectric properties than previously reported. The results revealed the possibility of higher p-type and n-type thermoelectric properties than previously reported. The search for oxide materials exhibiting even higher thermoelectric properties is a future issue.

研究分野：熱電変換、応用物性、固体物性、金属材料物性、無機材料物性

キーワード：ペロブスカイトFe酸化物 熱電特性 無次元性能指数 エネルギー変換効率 n型素子 p型素子 熱電変換材料 スピン状態

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

- (1) 近年、熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換できる熱電材料は、廃熱などの未利用排熱を回収し再有効活用可能なエナジーハーベスティングとして注目を集めている。現在、最も広く実用化されている熱電材料は $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ (p 型)や $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ (n 型)などの Bi_2Te_3 系半導体であるが、これらの材料は比較的毒性が高く、酸化環境下では化学的・物理的な安定性に乏しいという欠点がある。そこで、資源的に豊富で毒性の低い元素から構成され、かつ、高温・酸化環境下でも比較的安定な環境調和型材料として、酸化物系熱電材料が注目を集めている。しかしながら、酸化物系熱電材料は、 Bi_2Te_3 系半導体のように、同一母相或いは同一結晶構造で p 型および n 型の高い性能を示す材料が未だ見つかっていない。
- (2) 本研究では、p 型および n 型の高い性能を示す可能性のある酸化物としてペロブスカイト Fe 酸化物に着目し、 $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ ($0.1 < x < 0.7$) を研究した。その結果、 $x=0.1$ で $ZT=0.024$ ($T=850\text{K}$)の比較的高い p 型熱電特性を示す一方、 $x=0.7$ で $ZT=0.002$ ($T=850\text{K}$)の相対的に低い n 型熱電特性を示している[1]。

2. 研究の目的

- (1) 本研究は、 Fe^{3+} のスピン状態を制御し中間スピン Fe^{3+} が多数を占めるペロブスカイト Fe 酸化物 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ ($0.1 < x < 0.9$) を作製して、低温から高温までの結晶構造と磁気構造を同定して、従来のペロブスカイト Fe 酸化物の報告よりも高い p 型および n 型熱電特性を示す可能性を明らかにした。従って、本研究の目的は、n 型と p 型の同等な熱電特性を示すペロブスカイト型 Fe 酸化物を見出し、同一組成の酸化物を用いた pn デバイスの製造の可能性を提示することである。
- (2) 本研究により、p 型および n 型の高い性能を示すペロブスカイト Fe 酸化物が発見されれば、高温・酸化環境下での熱電発電のエネルギー変換効率向上に貢献するだけでなく、喫緊の課題である持続可能社会の促進をもたらす材料の実用化に、新しい展開がもたらされるものと期待される。

3. 研究の方法

- (1) 多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 < x < 0.9$) は一般的な固相反応法を用いて合成された。 Nd_2O_3 (99.9%, 富士フィルム和光純薬株式会社), SrCO_3 (99.99%, 富士フィルム和光純薬株式会社), Fe_2O_3 (99.9%, 富士フィルム和光純薬株式会社)を化学量論組成で秤量し、エタノール 20ml を加えたメノウ乳鉢で 1 時間湿式混合、1273K で空气中 24 時間仮焼き、粉末試料を 16Mpa の一軸圧力下でペレット状にプレスし、1473K で酸素雰囲気中 48 時間焼成して多結晶試料を合成した。合成した多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 < x < 0.9$) の酸素欠損量 δ は、3 回のヨウ素滴定の平均値から決定した。各試料の化学組成は、それぞれ、 $\text{Nd}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{FeO}_{3.00(3)}$ 、 $\text{Nd}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{FeO}_{2.99(4)}$ 、 $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{FeO}_{2.99(1)}$ 、 $\text{Nd}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_{2.989(8)}$ 、 $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3.00(2)}$ 、 $\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{FeO}_{2.99(1)}$ 、 $\text{Nd}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{FeO}_{2.99(9)}$ 、 $\text{Nd}_{0.3}\text{Sr}_{0.8}\text{FeO}_{2.965(5)}$ 、 $\text{Nd}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{FeO}_{2.952(3)}$ であった。
- (2) 多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 < x < 0.9$) の粉末中性子回折測定は、チェコ共和国の核物理研究所の原子炉 LVR-15 にある中分解能中性子粉末回折計(MEREDITH)を用いて、約 8g の粉末試料を直径 10mm の円筒形バナジウム試料ホルダーに装填し 500K、室温、低温(10K T 15K)の各温度において実施された。波長 $\lambda=1.875039\text{\AA}$ の単色中性子は Si(311)モノクロメーターから得られた。粉末中性子回折データは $2\theta=4\sim 143.95^\circ$ から 0.05° 刻みで測定した。全ての試料のリートベルト解析は、結晶構造には RIETAN-FP プログラム[2]、磁気構造には GSAS- プログラム[3] を用いて行われた。また、結晶構造と磁気構造は VESTA プログラムを使用して描画した[4]。
- (3) 磁化率 χ の温度依存性は、5K T 300K の温度範囲で SQUID (S700X-R, Cryogenic 社製)を用いて、300K T 700K の温度範囲で SQUID(MPMS, カンタムデザイン社製)を用いて、ゼロ磁場冷却(ZFC)下、1T の外部磁場印加により測定した。電気抵抗率 ρ とゼーベック係数 S の温度依存性は、ホール効果測定システム(ResiTest830, 東陽テクニカ製)を用いて T 400K の温度範囲で測定し、Ar 雰囲気下の自作装置を用いて 400K T 800K の温度範囲で測定した。熱伝導率 κ の温度依存性は、発電効率特性評価装置(PEM-2, アドバンス理工製)を用いて、300K T 540K の温度範囲で測定した。熱電特性(ρ, S, κ)から導出した無次元性能指数 ZT は、 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 < x < 0.9$) が高温で高い n 型および p 型の同等の熱電特性を示す可能性を強く示唆している。

4. 研究成果

- (1) 多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) の 500K、室温、低温 (10 K \leq T \leq 15 K) における粉末中性子回折パターン ($5^\circ \leq 2\theta \leq 140^\circ$) より、全ての試料はペロブスカイト構造の単相であることを確認した。また、500K および室温のいずれにおいても、 $x=0.1$ および 0.2 では単斜晶(空間群: $P2_1/m$)、 $x=0.3$ では斜方晶(空間群: $Pnma$)で、RIETAN-FP プログラム[2] および GSAS- プログラム[3] を用いて結晶構造および磁気構造が解析された。一方、低温では、 $x=0.1$ と 0.2 では単斜晶 (空間群: $P2_1/m$)、 $x=0.3$ と 0.4 では斜方晶 (空間群: $Pnma$)、 $x=0.5$ では単斜晶 (空間群: $C2/c$) で、RIETAN-FP プログラム[2] および GSAS- プログラム[3] を用いて結晶構造と磁気構造が解析された。

- (2) 図 1 は、単斜晶(空間群: $P2_1/m$)、斜方晶(空間群: $Pnma$)、単斜晶(空間群: $C2/c$)の擬立方晶について、それぞれ、(a) 500K、(b) 室温、(c) 低温での各格子定数の x 依存性を示す。 $x=0.2$ の単斜晶(空間群: $P2_1/m$)では $a/\sqrt{2}$ と $b/2$ に大きな差が確認されたが、500K および室温で $x=0.3$ の斜方晶(空間群: $Pnma$)では $a/\sqrt{2}$ と $b/2$ がほぼ同じ長さになることが確認された。また、 $x=0.2$ の単斜晶(空間群: $P2_1/m$)では $c/\sqrt{2}$ が最も短い、500K および室温では、 $0.5 \leq x \leq 0.7$ の斜方晶(空間群: $Pnma$)で $c/\sqrt{2}$ が最も長くなるのが分かる。一方、低温では、 $x=0.5$ の単斜晶(空間群: $C2/c$)で $\sqrt{(a^2 - c^2)}/2$ と $\sqrt{(b^2 + c^2)}/2$ の 2 種類の長さが存在し、 $0.5 \leq x \leq 0.7$ では後者の方が前者より長い。この格子定数の大きさの逆転は、各試料における磁気モーメントの配列方向に影響を与える。実際、 $x=0.2$ では c 軸方向に G 型の反強磁性を示す磁気モーメントが配向しているが、 $0.4 \leq x \leq 0.8$ では室温または低温で a 軸方向または b 軸方向に G 型の反強磁性を示す磁気モーメントがそれぞれ配向している。

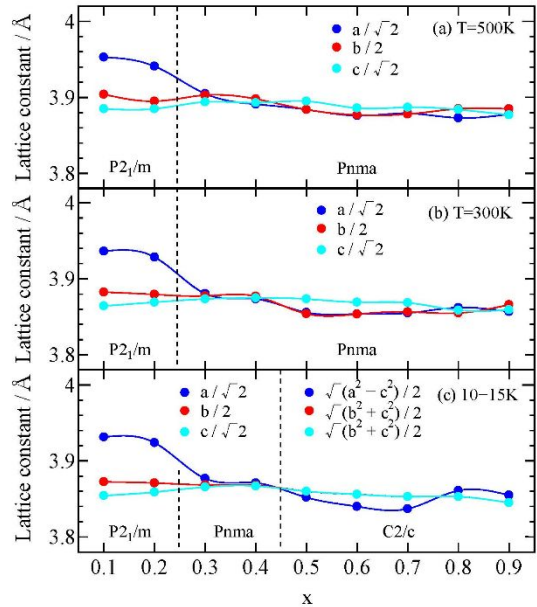


Fig. 1 Lattice constants of pseudo-cubic of $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) at (a) 500K, (b) 300K, and (c) $10 \text{ K} \leq T \leq 15 \text{ K}$.

- (3) 図 2 は、(a) 500K、(b) 室温、(c) 低温における Fe サイトの磁気モーメントの絶対値 $|M|$ の x 依存性を実線で示す。同時に、常磁性領域での磁化率の逆数 ($\chi^{-1} - \chi_0^{-1}$) の温度依存性から得られるキュリー定数から推定した Fe サイトでの実効磁気モーメント μ_{eff} の x 依存性も破線で示す。500K、室温、低温の単斜晶(空間群: $P2_1/m$)では Fe1 サイトと Fe2 サイトの磁気モーメントが異なるため、Fe1 サイトの $|M|$ を実丸、Fe2 サイトの $|M|$ を空丸でプロットしている。500K の斜方晶(空間群: $Pnma$)では、磁気構造を解析するのに必要十分な磁気ピークを観測することができなかったため $|M|$ はプロットされていない。室温と低温の斜方晶(空間群: $Pnma$)では、Fe1 サイトの $|M|$ は実四角でプロットされている。低温の単斜晶 ($C2/c$)では、Fe1_2 サイトと Fe1_3 サイトの磁気モーメントも異なるので、Fe1_2 サイトの $|M|$ を実四角でプロットし、Fe1_3 サイトの $|M|$ を実三角でプロットしている。一方、磁化率の逆数から推定した Fe サイト当たりの μ_{eff} は全ての x について空四角でプロットした。 x が大きくなると $|M|$ は全体的に減少傾向を示すが、 μ_{eff} は約 $2.8 \mu_B$ でほぼ一定を取る。また、低温では $x=0.7$ において $|M|$ と μ_{eff} がよく一致するが、500K や、特に、室温の $x=0.3$ において $|M|$ と μ_{eff} の間に大きな相違があることが分かる。このことは、低温では反強磁性秩序を示すべき磁気モーメントのベクトル和が、室温以上の常磁性領域では熱散乱によって相殺されていることを示唆している。

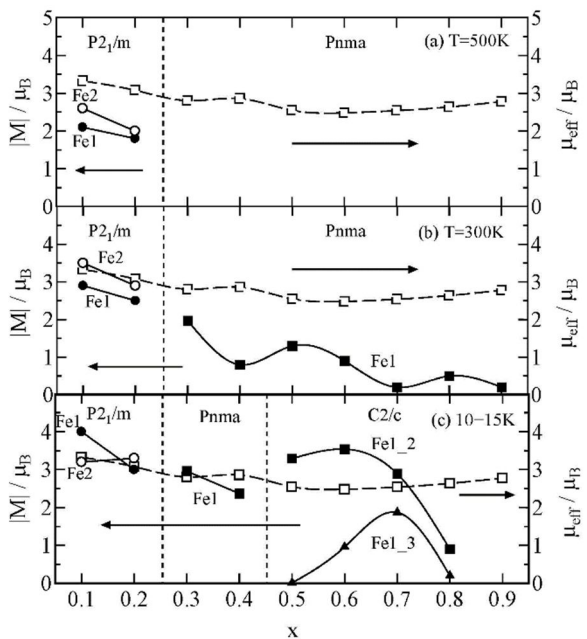


Fig. 2 Magnetic moment obtained from PND measurement at (a) 500K, (b) 300K, and (c) $10 \text{ K} \leq T \leq 15 \text{ K}$, and effective magnetic moment of $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$).

このことは、低温では反強磁性秩序を示すべき磁気モーメントのベクトル和が、室温以上の常磁性領域では熱散乱によって相殺されていることを示唆している。

- (4) 図 3 は、多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) について、磁化率 $\chi - \chi_0$ と磁化率の逆数 $(\chi - \chi_0)^{-1}$ の温度依存性を示し、ゼロ磁場冷却(ZFC)の条件下で、1T の外部磁場を印加し、5K T 700K の昇温過程で磁化測定した。ここで、 χ_0 は温度に依存しない磁化率であり、図 3(a)の挿入図に示すように、 $\chi - \chi_0$ と T^{-1} の関係から、高温極限に外挿することにより決定される。また、図 3(a) に示すように、全ての試料において、温度上昇に伴い磁化率が減少する傾向を示し、低温の G 型反強磁性から高温の常磁性へ磁気相転移が確認される。従って、図 3(b)での各プロットの接線は、高温でのキュリー-ワイス則に従う常磁性領域にあることを示している。一般に常磁性磁化率の温度依存性は、キュリー定数を C 、キュリー温度を Θ とすると、 $\chi - \chi_0 = C(T - \Theta)^{-1}$ の温度依存性から、磁化率の逆数 $(\chi - \chi_0)^{-1}$ は温度 T に比例し、接線の傾き C^{-1} からキュリー定数を計算すると、Fe サイトの有効磁気モーメント μ_{eff} が見積もられる。

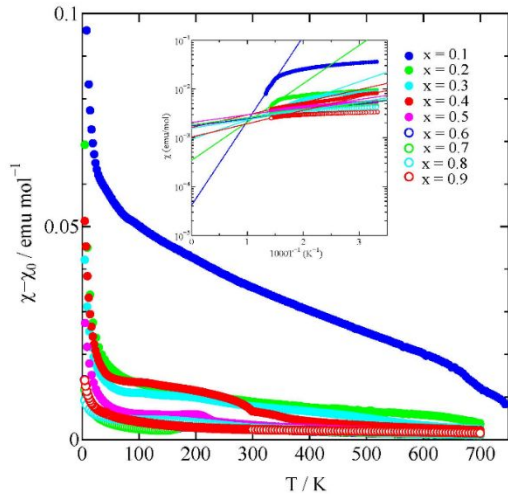


Fig. 3(a) Temperature dependence of magnetic susceptibility, $\chi - \chi_0$, for $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) under zero-field cooling conditions at a magnetic field of 1T during the warming process, where the temperature-independent term, χ_0 , is evaluated from $\chi(T \rightarrow \infty)$ as shown in the inset.

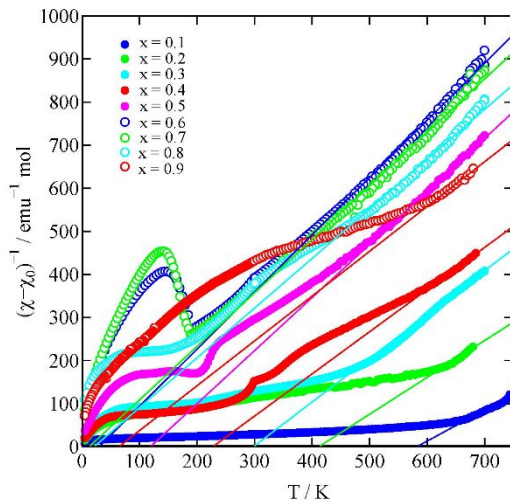


Fig. 3(b) Temperature dependence of inverse magnetic susceptibility, $(\chi - \chi_0)^{-1}$, for $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$). The straight lines represent in the Curie-Weiss laws above 650K.

- (5) 図 4 は、多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) の 80K T 800K における電気抵抗率 ρ の温度依存性を示す。全試料は、全温度範囲で、温度増加に伴い電気抵抗率が減少する半導体的挙動を示し、 ρ は x が増加すると減少傾向にある。ただし、 $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3.00(2)}$ では一旦減少傾向が止まり、 $\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{FeO}_{2.99(1)}$ で増加傾向を示すが、 $\text{Nd}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{FeO}_{2.991(9)}$ 、 $\text{Nd}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{FeO}_{2.965(5)}$ 、 $\text{Nd}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{FeO}_{2.952(3)}$ では、 x の増加に従って再び ρ の減少傾向を示している。

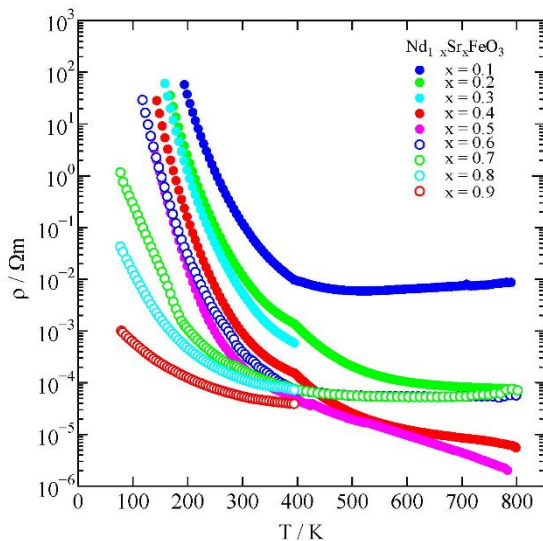


Fig. 4 Temperature dependence of electric resistivity, ρ , for $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$).

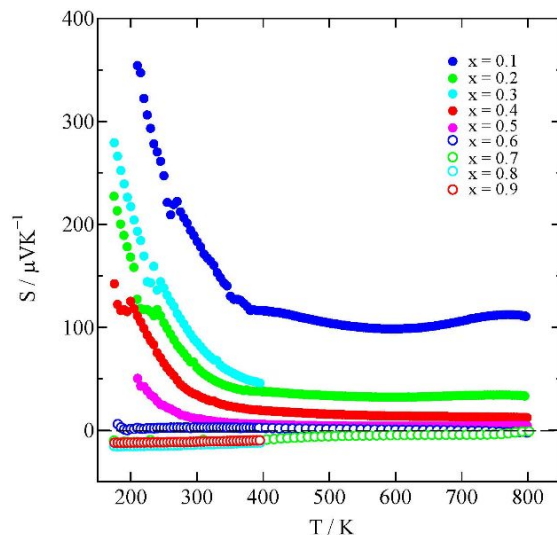


Fig. 5 Temperature dependence of Seebeck coefficient, S , for $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$).

- (6) 図 5 は、多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) の 170K T 800K におけるゼーベック係数 S の温度依存性を示す。特に、 $x \leq 0.5$ で p 型熱電特性を示し、ゼーベック係数の絶対値 $|S|$ は x の増加とともに減少する。一方、 $x \geq 0.6$ では n 型熱電特性を示し、ゼーベック係数の絶対値 $|S|$ は x の増加と共に僅かではあるが増加傾向にある。従って、 $0.6 \leq x \leq 0.9$ の高温では、特に、 $x = 0.8$ で高い n 型の熱電特性が期待される。

(7) 図 6 は、多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) の 300 K T 540 K における熱伝導率 $\kappa (= \kappa_L + \kappa_e)$ およびキャリア熱伝導率 κ_e の温度依存性を示す。ここで、 κ_L は格子の熱伝導率であり、 κ_e はウィーデマン-フランツ則 ($\kappa_e = L_0 \sigma T$) より計算される。 L_0 はローレンツ数である。図 6 に示す通り、 κ_e は温度上昇と共に単調増加するが、 κ_e の κ に対する比率は、 κ_L の κ に対する比率と比較して相対的に小さい。従って、全ての試料において、 κ_L は κ_e よりも大きく、 κ は主に κ_L によって支配されている。従って、 κ は全試料で、全温度範囲において $2.5 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ を維持している。

(8) 図 7 は、多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) の 170 K T 800 K における無次元性能指数 ZT の温度依存性を示す。 ZT は全試料で温度上昇と共に単調増加している。特に、 $\text{Nd}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{FeO}_{2.996(4)}$ は 800 K で $ZT=0.0062$ の高い p 型熱電特性を示しており、 $\text{Nd}_{0.3}\text{Sr}_{0.8}\text{FeO}_{2.965(5)}$ 、 $\text{Nd}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{FeO}_{2.952(3)}$ においても、高温で高い n 型熱電特性を示す可能性が期待される。我々は、多結晶試料 $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ ($0.1 \leq x \leq 0.7$) において、 $x=0.7$ で $ZT=0.002$ ($T=850 \text{ K}$) の n 型の熱電特性[4]を確認したが、p 型熱電特性と同程度の熱電特性を得られておらず、多結晶試料 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) では p 型と n 型で同程度の熱電特性を示す可能性が示唆される。しかしながら、図 7 の挿入図に示すように、 $\text{Nd}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{FeO}_{3.00(3)}$ および $\text{Nd}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{FeO}_{2.965(5)}$ の $T=600 \text{ K}$ における線熱膨張係数はそれぞれ $11.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ および $28.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ である。このことは、p 型と n 型の $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$) 試料間で、同程度の線膨張係数が実現されていない可能性を示唆している。ペロブスカイト型 Fe 酸化物の pn 素子を用いた熱電モジュール作製には、同程度の線熱膨張係数を示す材料を更に探索することが今後の課題である。

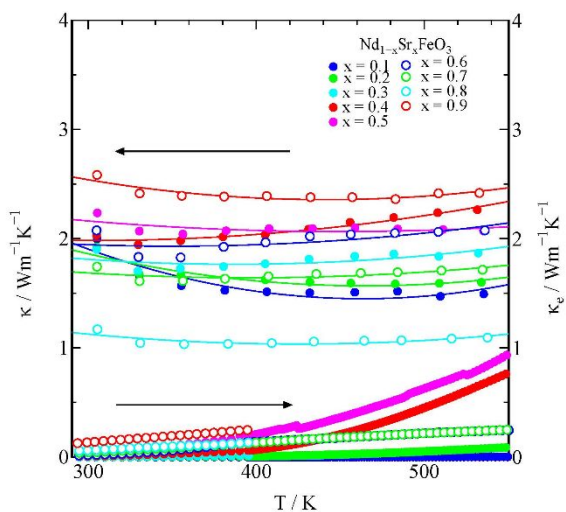


Fig. 6 Temperature dependence of the total thermal conductivity, $\kappa = \kappa_L + \kappa_e$, above room temperature for $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$). The temperature dependence of the carrier thermal conductivity, $\kappa_e = L_0 \sigma T$, for all samples are also shown by using the Wiedemann-Franz law.

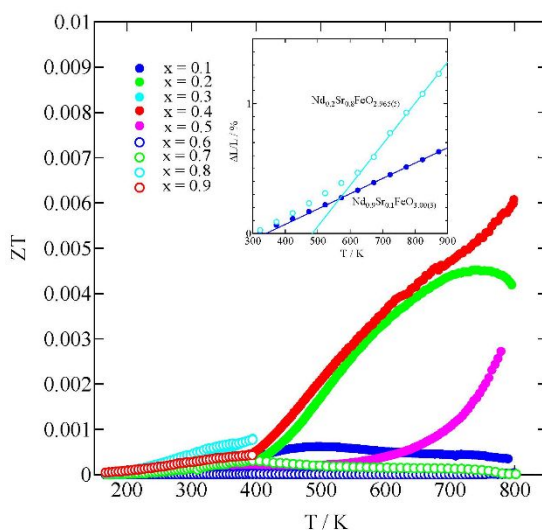


Fig. 7 Temperature dependence of the dimensionless figures of merit, ZT , for $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($0.1 \leq x \leq 0.9$). The insets show temperature dependence of coefficient of linear thermal expansions for $\text{Nd}_{0.3}\text{Sr}_{0.8}\text{FeO}_{2.965(5)}$ and $\text{Nd}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{FeO}_{3.00(3)}$.

参考文献

- [1] H.Nakatsugawa, M.Saito, and Y.,Okamoto, Mater.Trans. **60**, 1051 (2019).
- [2] F.Izumi and K.Momma, Solid State Phenom. **130**, 15 (2007).
- [3] A.C.Larson and R.B.Von Dewwllw, Los Alamos National Laboratory Report LAUR 86 (2004).
- [4] K.Momma and F.Izumi, J.Appl.Crystallogr. **41**, 653 (2008).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Nakatsugawa, T.Ozaki, H.Kishimura, and Y. Okamoto	4. 巻 49
2. 論文標題 Thermoelectric Properties of Heusler Fe ₂ TiSn Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2802-2812
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11664-019-07855-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Nakatsugawa, Miwa Saito, and Yoichi Okamoto	4. 巻 60
2. 論文標題 High-Temperature Thermoelectric Properties of Pr _{1-x} Sr _x FeO ₃ (0.1 x 0.7)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1051 ~ 1060
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.E-M2019812	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 P. Rajasekaran, Y. Kumaki, M. Arivanandhan, M. S. Ibrahim Khaleeullah, R. Jayavel, H. Nakatsugawa, Y. Hayakawa, M. Shimomura	4. 巻 597
2. 論文標題 Effect of Sb substitution on structural, morphological and electrical properties of BaSnO ₃ for thermoelectric application	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics B: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 412387
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physb.2020.412387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中津川博, 風間峻太, 齋藤美和, 岡本庸一
2. 発表標題 ペロブスカイト酸化物Sm _{1-x} Sr _x FeO ₃ の熱電特性
3. 学会等名 応用物理学会 春季(第67回)学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中津川博, 齋藤美和, 岡本庸一
2. 発表標題 ペロブスカイト酸化物Nd _{1-x} Sr _x FeO ₃ (0.1 x 0.5) の熱電特性
3. 学会等名 応用物理学会 2019年秋季(第80回)講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nakatsugawa, S.Kazama, M.Saito, and Y.Okamoto
2. 発表標題 Thermoelectric properties of (Pr, Nd, Sm) _{1-x} Sr _x FeO ₃ (0.1 x 0.5)
3. 学会等名 MATERIALS RESEARCH MEETING 2019 (MRM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中津川博, 風間竣太, 齋藤美和, 岡本庸一
2. 発表標題 ペロブスカイト酸化物Sm _{1-x} Sr _x FeO ₃ の熱電特性
3. 学会等名 応用物理学会 第67回春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鎌谷雄大, 中津川博, 岡本庸一, Charles H. Hervoches
2. 発表標題 Nd _{1-x} Sr _x FeO ₃ (0.1 x 0.9)の熱電特性と磁気特性
3. 学会等名 日本熱電学会 第18回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鎌谷雄大, 中津川博, 岡本庸一, Charles H.Hervoches
2. 発表標題 Nd _{1-x} Sr _x FeO ₃ - (0.1 x 0.9) の熱電特性と磁気特性
3. 学会等名 応用物理学会 第69回春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Nakatsugawa, Y. Kamatani, and C. H. Hervoches
2. 発表標題 Crystal structure and magnetism in Nd _{1-x} Sr _x FeO ₃ (0.1 x 0.9)
3. 学会等名 The 25th General Assembly and Congress of the International Union of Crystallography (IUCrXXV2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	齋藤 美和 (Saito Miwa) (60594215)	神奈川大学・工学部・助教 (32702)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------