

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05520

研究課題名(和文)パイロクロア格子磁性体におけるスピン分子状態へのボンドランダムネス効果の研究

研究課題名(英文) Study of bond randomness effects on molecular-spin state in pyrochlore lattice magnets

研究代表者

渡辺 忠孝 (WATANABE, Tadataka)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：70409051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：磁性体で生じるフラストレーションには、結晶格子の幾何学的制約により生じる幾何学的フラストレーションと異種の磁気相互作用の競合により生じるボンドフラストレーションがあるが、パイロクロア格子磁性体は典型的な幾何学的フラストレーション磁性体として知られる。本研究課題では、パイロクロア格子磁性体であるスピネル酸化物 $ZnCr_2O_4$ やパイロクロア弗化物 $NaCaCo_2F_7$ などについて、元素置換効果の研究や超音波音速測定を行い、磁性へのボンドランダムネス効果を研究した。その結果、ボンドランダムネスの導入により幾何学的フラストレーションとボンドフラストレーションの競合が生じることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で行った研究は、幾何学的フラストレーション磁性体にボンドランダムネスを導入することで幾何学的フラストレーションとボンドフラストレーションの競合が生じることを明らかにした。このような競合は、強い磁気揺らぎを生じさせる効果が期待できるため、幾何学的-ボンドフラストレーション競合系の磁性体においては多彩な新奇物性が発現することが期待される。本研究課題は、幾何学的-ボンドフラストレーション競合系というフラストレーション磁性の新たな研究対象を提案するものである。

研究成果の概要(英文)：For the frustration arising in magnets, there are two types: one is the geometrical frustration arising from geometric constraint of crystal lattice, and another is the bond frustration arising from competition of different kinds of magnetic interactions. Pyrochlore-lattice magnets are known to be typical geometrically-frustrated magnets. In this research project, we studied effects of bond randomness on the magnetism of pyrochlore magnets such as spinel oxide  $ZnCr_2O_4$  and pyrochlore fluoride  $NaCaCo_2F_7$ . In the study of element substitution effects and the ultrasound velocity measurements performed in this research project, we found that the introduction of bond randomness induces the competition between geometrical and bond frustrations.

研究分野：強相関物性

キーワード：フラストレーション ボンドランダムネス効果 パイロクロア格子 スピネル酸化物 パイロクロア弗化物 超音波測定 スピン分子状態 スピンヤーンテラー効果

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

三次元の幾何学的フラストレート系であるパイロクロア格子磁性体では、研究開始当初までの非弾性中性子散乱実験や超音波音速測定などの研究から、スピン分子状態とよばれる特殊なスピン液体状態が普遍的に発現しうることが明らかになってきていた。スピン分子状態とは、特徴的な幾何学形状のスピン-重項クラスターが格子全体を埋めつくして共鳴した状態のことであるが、研究開始当初までの研究では、スピン分子が格子や軌道などの自由度と強く結合する性質をもつこともわかってきていた。例えば、クロムスピネル酸化物  $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$  において、スピン分子状態でボンドランダムネスにより制御される量子臨界現象が発現することを示唆する実験結果などが得られていた。

### 2. 研究の目的

本研究課題は、スピネル酸化物やパイロクロア化合物、ラーベス相化合物などの幾何学的フラストレート系パイロクロア格子磁性体について、スピン分子状態へのボンドランダムネス効果を研究するとともに、スピン分子が複合自由度と絡んで創出する新奇物性を探索することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、スピネル酸化物やパイロクロア化合物、ラーベス相化合物などの研究対象物質について、各結晶サイトを元素置換した混晶の多結晶作製と物性評価((低温)X線回折測定、直流/交流磁化率測定、比熱測定)を行い、幾何学的フラストレート磁性への元素置換効果(ボンドランダムネス効果)を研究した。また、研究対象物質の単結晶について全ての独立な弾性モードでの超音波音速測定を行い、弾性特性を調べることで幾何学的フラストレート磁性へのボンドランダムネス効果を研究した。

### 4. 研究成果

幾何学的フラストレート磁性への元素置換効果の研究では、クロムスピネル酸化物  $A\text{Cr}_2\text{O}_4$  ( $A = \text{Zn}, \text{Cd}$ )のCrサイトを元素置換した混晶  $A(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_4$  についての研究で顕著な研究成果を得た。超音波音速測定による研究では、バナジウムスピネル酸化物  $\text{CoV}_2\text{O}_4$  の不定比物質  $\text{Co}_{1+x}\text{V}_{2-x}\text{O}_4$ 、低次元系バナジウム酸化物  $\text{CaV}_2\text{O}_4$ 、およびコバルトパイロクロア化合物  $\text{NaCaCo}_2\text{F}_7$  についての研究で顕著な研究成果を得た。以下でこれらの研究成果について報告する。

クロムスピネル酸化物  $A\text{Cr}_2\text{O}_4$  ( $A = \text{Zn}, \text{Cd}$ )の磁性Crサイトを磁性Feイオンで置換した混晶  $A(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_4$  ( $A = \text{Zn}, \text{Cd}$ )について、多結晶を用いた直流/交流磁化率および比熱の測定を行った。 $A\text{Cr}_2\text{O}_4$ は、軌道不活性な  $\text{Cr}^{3+}$  ( $t_{2g}^3e_g^0$ ,  $S = 3/2$ )がパイロクロア格子を形成する磁性体であり、スピン自由度のみが磁性を支配する典型的な幾何学的フラストレート磁性体である。 $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ は、強い反強磁性相関を有しながら(ワイス温度は約-400 K)、 $T_N = 13$  Kの低温で立方晶から正方晶への格子歪を伴った反強磁性転移を示す。この  $T_N = 13$  Kでの磁気構造相転移は、スピン・格子結合を介して結晶の対称性を下げることで幾何学的フラストレーションを解消する、いわゆるスピン・ヤーンテラー転移であると考えられている。 $\text{CdCr}_2\text{O}_4$ は、 $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ に比べると反強磁性相関は弱いもの(ワイス温度は約-70 K)、 $T_N = 8$  Kの低温で立方晶から正方晶への格子歪を伴った反強磁性転移を示すことから、 $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ と同じくスピン・ヤーンテラー転移を示す幾何学的フラストレート磁性体であると考えられている。本研究では、 $\text{Zn}(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_4$ と  $\text{Cd}(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_4$ のいずれにおいても、約10 K以下の低温でスピングラス挙動を示すことが明らかになった。また、交流磁化率測定からは、 $\text{Zn}(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_4$ と  $\text{Cd}(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_4$ のいずれにおいても、スピングラスのスローダイナミクスが非幾何学的フラストレート磁性体のそれとは異なるものであることが明らかになった。さらに、 $\text{Zn}(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_4$ における比熱測定では、スピングラス転移温度(約10 K)よりもわずかに高い温度(約12 K)で幾何学的フラストレーションの解消を促す格子歪(構造相転移)を示すことが示唆された。本研究は、 $A(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_4$ において幾何学的フラストレーションとボンドフラストレーションの競合が生じていることを示唆するものである。本研究の成果に関する論文は、Journal of Magnetism and Magnetic Materials誌より発表した(Y. Koga *et al.*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **476**, 464 (2019))。

バナジウムスピネル酸化物  $\text{CoV}_2\text{O}_4$  に不定比性(ボンドランダムネス)を導入した  $\text{Co}_{1.21}\text{V}_{1.79}\text{O}_4$  について、単結晶を用いた超音波音速測定を行った。本研究は、早稲田大学との共同研究として実施した。バナジウムスピネル  $A\text{V}_2\text{O}_4$  ( $A = \text{Zn}, \text{Mg}, \text{Cd}, \text{Mn}, \text{Fe}$ )は、パイロクロア格子を形成する  $V^{3+}$  サイト ( $t_{2g}^2e_g^0$ ,  $S = 1$ )が軌道自由度を有し、低温で構造相転移(転移温度  $T_s$ )と反強磁性転移(転移温度  $T_N$ )の逐次相転移( $T_s > T_N$ )を示す。これは、 $T_s$ で軌道整列が生じて結晶の対称性が低下し、より低温の  $T_N$ で反強磁性転移(幾何学的フラストレーションの解消)が生じる逐次相転移であると考えられている。コバルトバナジウムスピネル  $\text{CoV}_2\text{O}_4$ は、上記の  $A\text{V}_2\text{O}_4$ とは異なり低温まで構造相転移を示さずスピネル立方晶を維持し、 $T_C = 150$  Kでフェリ磁性転移を示す。また、 $\text{CoV}_2\text{O}_4$ は、バナジウムスピネル  $A\text{V}_2\text{O}_4$ の中で最も電子の遍歴性が強い物質である。本研究

で  $\text{Co}_{1.21}\text{V}_{1.79}\text{O}_4$  の音速の温度依存性を測定したところ、常磁性相とフェリ磁性相のいずれにおいても弾性モードに依存する多様な弾性異常が観測された。常磁性相 ( $T > T_C$ ) においては、スピン分子励起に由来する弾性異常が観測された。また、このスピン分子励起由来の弾性異常は、磁場印加により抑制されることが明らかになった。この磁場効果は負の磁気抵抗効果を伴うことから、磁場によりスピン分子励起由来の弾性異常が抑制され電子の遍歴性が增強していることが示唆された。フェリ磁性相 ( $T < T_C$ ) においては、 $T_1 = 95 \text{ K}$  と  $T_2 = 50 \text{ K}$  で新しい逐次転移に由来する弾性異常が観測された。 $T_1 = 95 \text{ K}$  での弾性異常は軌道グラス挙動の発現を示唆するものであり、 $T_2 = 50 \text{ K}$  での弾性異常は構造相転移を示唆するものである。本研究から、フェリ磁性相内での逐次転移が電子の遍歴性を抑制する、すなわち電子の局在性を増強するものであることが示唆された。さらに、本研究からは、 $\text{CoV}_2\text{O}_4$  のフェリ磁性相内で発現する軌道グラス挙動が、不定比性の導入 ( $\text{Co}_{1+x}\text{V}_{2-x}\text{O}_4$ ) により抑制されることが示唆された。本研究の成果に関する論文は、Physical review B 誌より発表した (T. Watanabe *et al.*, Physical Review B **96**, 014422 (2017))。

低次元系バナジウム酸化物  $\text{CaV}_2\text{O}_4$  について、単結晶を用いた超音波音速測定を行った。本研究は、ベルリン・ヘルムホルツ研究所 (独)、アイオワ州立大学 (米)、茨城高専との共同研究として実施した。 $\text{CaV}_2\text{O}_4$  は、磁性を担う V サイトが一次元ジグザグ鎖を形成する斜方晶の物質であり、 $\text{V}^{3+}$  サイトの  $3d$  電子 ( $t_{2g}^2 e_g^0$ ,  $S = 1$ ) は軌道自由度を有する。この物質は、 $T_s = 140 \text{ K}$  で軌道縮退を解く構造相転移 (斜方晶から単斜晶) を示し、 $T_N = 70 \text{ K}$  で反強磁性転移を示すが、音速の温度依存性を測定した結果、 $T > T_s$  の軌道縮退した常磁性相と、 $T_N < T < T_s$  の軌道縮退が解けた常磁性相において、それぞれ異なる弾性モードに降温とともに弾性率がソフト化する異常が観測された。 $T > T_s$  の軌道縮退した常磁性相でのソフト化は、軌道揺らぎに由来する弾性異常であると考えられる。一方、 $T_N < T < T_s$  の軌道縮退が解けた常磁性相でのソフト化は、スピン揺らぎに由来する弾性異常であると考えられる。本研究より、 $\text{CaV}_2\text{O}_4$  においては、 $T_s = 140 \text{ K}$  での構造相転移により軌道縮退が解けると同時に 1 次元スピン状態が誘起されること、さらにはこの 1 次元スピン状態はスピン・格子結合を介して降温とともに 3 次元スピン相関へとクロスオーバーして結果として  $T_N = 70 \text{ K}$  で反強磁性転移が生じることが示唆された。本研究の成果に関する論文は、Physical review B 誌より発表した (T. Watanabe *et al.*, Physical Review B **98**, 094427 (2018))。

コバルトパイロクロア弗化物  $\text{NaCaCo}_2\text{F}_7$  について、単結晶を用いた超音波音速測定を行った。本研究は、プリンストン大学 (米)、茨城高専との共同研究として実施した。 $\text{NaCaCo}_2\text{F}_7$  は、Na と Ca が同一サイトをランダムに占有した立方晶の結晶構造を有し、磁性を担う Co パイロクロア格子にボンドランダムネスが生じていると考えられる。この物質は、ワイス温度 (約  $-140 \text{ K}$ ) よりもはるかに低温の約  $2.5 \text{ K}$  以下でスピングラス挙動を示すことから、強いフラストレーションを有するボンドランダム磁性体であると考えられている。本研究で  $\text{NaCaCo}_2\text{F}_7$  の音速の温度依存性を測定したところ、ゼロ磁場下では立方晶の体積弾性率が降温とともにソフト化する弾性異常が観測された。このソフト化は、元来  $\text{NaCaCo}_2\text{F}_7$  に存在する交換相互作用パスのランダムネスがさらに增強していることを示唆するものであり、低温でのスピングラス挙動、すなわちフラストレーションの解消がスピン・格子結合を介して生じていることを示唆するものである。また、本研究では、体積弾性率のソフト化が磁場印加とともに抑制されることも確認された。一方、 $\text{NaCaCo}_2\text{F}_7$  の三方せん断弾性率においては、体積弾性率で観測されたソフト化とは異なるスピン分子励起に由来する弾性異常が観測された。この三方せん断弾性率の弾性異常は、体積弾性率のソフト化とは対照的に磁場印加に伴い增強されることが確認された。本研究は、 $\text{NaCaCo}_2\text{F}_7$  において、磁場誘起の格子不安定クロスオーバー、具体的にはスピングラス挙動を誘起する全対称の格子不安定性 (体積弾性率のソフト化) からスピン分子状態に由来する三方対称の格子不安定性 (三方せん断弾性率の弾性異常) へのクロスオーバーが生じていることを明らかにしたものである。本研究の成果に関する論文は、Physical review B 誌より発表した (T. Watanabe *et al.*, Physical Review B **101**, 214425 (2020))。本論文は、Physical review B 誌の Editors' Suggestion に選出された。

以上では、本研究課題で得た顕著な研究成果について報告した。本研究課題では、上記の成果の他にも今後の研究の進展が期待される研究成果を数多く得ることができた。以下では、そのような研究成果のうち、ラーベス相鉄化合物  $\text{TiFe}_2$  と  $\text{NbFe}_2$  における元素置換効果の研究の成果を報告する。

ラーベス相鉄化合物  $\text{TiFe}_2$  の Fe サイトを Mn で置換した混晶  $\text{Ti}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)\text{Fe}_2$  について、多結晶を用いた直流/交流磁化率および比熱の測定を行った。 $\text{TiFe}_2$  は六方晶 (MgZn<sub>2</sub> 型) の結晶構造を持ち、 $T_N = 280 \text{ K}$  で反強磁性転移を示す遍歴磁性体である。不定比の  $\text{TiFe}_{2+y}$  においては、 $y < 0$  で反強磁性転移 ( $T_N = 280 \text{ K}$ ) を示すのに対して、 $y > 0$  では強磁性転移 ( $T_C = 350 \text{ K}$ ) を示すことが知られており、磁性がボンドランダムネスに敏感であることが示唆されている。本研究では、 $\text{Ti}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)\text{Fe}_2$  が  $x > 0.1$  で反強磁性転移と強磁性転移の逐次転移を示すこと、またこれらの磁気転移温度が Mn 置換量  $x$  の増加とともに抑制されて  $0.4 < x < 0.6$  では低温まで磁気転移を示さないこと、さらには  $x > 0.6$  では新たな強磁性転移を示すことが明らかになった。また、比熱測定では、 $\text{Ti}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)\text{Fe}_2$  の電子比熱係数が  $x < 0.5$  で  $x$  の増加とともに大きくなることが確認された。本研究は、 $\text{Ti}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)\text{Fe}_2$  において  $0.4 < x < 0.6$  の Mn 置換量  $x$  領域で量子臨界挙動が発現していることを示唆するものである。

ラーベス相鉄化合物  $\text{NbFe}_2$  の Nb サイトを Ti で置換した混晶  $(\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{Fe}_2$  について、多結晶を用いた直流/交流磁化率および比熱の測定を行った。 $\text{NbFe}_2$  は六方晶 ( $\text{MgZn}_2$  型) の結晶構造を持ち、 $T_{\text{SDW}} = 10 \text{ K}$  で SDW 転移を示す遍歴磁性体である。 $\text{NbFe}_2$  に不定比性を導入した  $\text{Nb}_{1-y}\text{Fe}_{2+y}$  において、 $y_c = -0.015$  で強磁性量子臨界性が発現することが過去の研究から示唆されている。本研究では、 $(\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{Fe}_2$  が強磁性転移や反強磁性転移など Ti 置換量  $x$  に依存した多数の磁気転移を示す複雑な磁気相図を有することが明らかになった。本研究から、 $\text{NbFe}_2$  の Nb サイト置換混晶である  $(\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{Fe}_2$  は、強磁性量子臨界性を示す不定比  $\text{Nb}_{1-y}\text{Fe}_{2+y}$  とは異なるボンドランダムネス効果を示すことが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Watanabe, H. Kato, Y. Hara, J. W. Krizan, and R. J. Cava	4. 巻 101
2. 論文標題 Softening of breathing elastic mode and trigonal elastic mode in the disordered pyrochlore magnet NaCaCo <sub>2</sub> F <sub>7</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214425-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.101.214425	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 該当する
1. 著者名 Y. Koga, R. Okada, S. Kobayashi, H. Yamada, T. Watanabe	4. 巻 476
2. 論文標題 Substitution effects on frustrated magnetism of chromite spinel ACr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (A=Zn, Cd)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 464-468
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmmm.2019.01.014	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 T. Watanabe, S. Kobayashi, Y. Hara, J. Xu, B. Lake, J.-Q. Yan, A. Niazi, and D. C. Johnston	4. 巻 98
2. 論文標題 Orbital- and spin-driven lattice instabilities in quasi-one-dimensional CaV <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094427-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.98.094427	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 該当する
1. 著者名 Tadataka Watanabe, Shogo Yamada, Rui Koborinai, and Takuro Katsufuji	4. 巻 96
2. 論文標題 Variety of elastic anomalies in an orbital-active nearly itinerant cobalt vanadate spinel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014422-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.96.014422	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 Susumu Okubo, Hitoshi Ohta, Tatsuya Iijima, Tatsuya Yamasaki, Weimin Zhang, Shigeo Hara, Shin-ichi Ikeda, Hiroyuki Oshima, Miwako Takahashi, Keisuke Tomiyasu, and Tadataka Watanabe	4. 巻 231
2. 論文標題 THz ESR Study of Spinel Compound GeCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Zeitschrift für Physikalische Chemie - International Journal of Research in Physical Chemistry and Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 827-837
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/zpch-2016-0841	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85件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 吉田優紀、渡辺忠孝
2. 発表標題 クロムスピネルMgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村嶺、F. Lang, D. Prabhakaran, S. Blundell, 原嘉昭、渡辺忠孝
2. 発表標題 擬ブルッカイト型鉄酸化物FeTi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> の超音波音速測定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥村陸、安田裕一、猪瀬卓己、宮坂響、渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス相化合物AFe <sub>2</sub> (A = Nb, Ce)の元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口真悟、渡辺忠孝
2. 発表標題 ヘテロライト型マンガン酸化物CdMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性へのMnサイト置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪瀬卓己、渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス相化合物NbFe <sub>2</sub> の磁性への置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村下正樹、渡辺忠孝
2. 発表標題 ZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> のスピンヤーンテラー転移に対する置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田優紀、渡辺忠孝
2. 発表標題 クロムスピネルMgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性へのMgサイト置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 嶺、F. Lang、D. Prabhakaran、S. Blundell、原嘉昭、渡辺忠孝
2. 発表標題 スピンドラフト系鉄酸化物FeTi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> の弾性特性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮坂響、渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス相化合物CeFe <sub>2</sub> の磁性への置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪瀬卓己、渡辺忠孝
2. 発表標題 強磁性量子臨界物質NbFe <sub>2</sub> における元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮坂響、渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物CeFe <sub>2</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田優紀、山口慎吾、渡辺忠孝
2. 発表標題 クロムスピネル(Mg <sub>1-x</sub> Ca <sub>x</sub> )Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村下正樹、渡辺忠孝
2. 発表標題 クロムスピネルZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口真悟、渡辺忠孝
2. 発表標題 ヘテロライト型マンガン酸化物CdMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> における元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊麻衣、高柳和也、B. C. Sales、原嘉昭、渡辺忠孝
2. 発表標題 カンター合金ランダム磁性体 Cr <sub>x</sub> CoNi の超音波音速測定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 嶺、高柳和也、F. Lang、D. Prabhakaran、S. Blundell、原嘉昭、渡辺忠孝
2. 発表標題 スピンプラストレート系鉄酸化物FeTi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> の超音波音速測定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪瀬卓己、渡辺忠孝
2. 発表標題 強磁性量子臨界物質NbFe <sub>2</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木敦智、渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物ZrFe <sub>2</sub> の遍歴磁性への置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮坂響、渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス相化合物CeFe <sub>2</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口真悟、渡辺忠孝
2. 発表標題 マンガン酸化物 CdMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村下正樹、渡辺忠孝
2. 発表標題 ZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> のスピンヤーンテラー転移への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦慧悟、渡辺忠孝
2. 発表標題 スピンプラストレート系スピネルCdFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高柳和也、F. Kirschner、D. Prabhakaran、S. Blundell、原嘉昭、渡辺忠孝
2. 発表標題 スピンプラストレート系コバルト酸化物CoTi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> の弾性異常
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木敦智, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物ZrFe <sub>2</sub> の遍歴磁性へのZrサイト置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 猪瀬卓己, 鈴木敦智, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物Nb <sub>1-y</sub> Fe <sub>2+y</sub> の磁性へのアニール効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口真悟, 三浦慧悟, 渡辺忠孝
2. 発表標題 マンガン酸化物CdMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村下正樹, 土田季樹, 古賀裕也, 辻村史弥, 渡辺忠孝
2. 発表標題 クロマイトスピネルZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高柳和也, F. Kirschner, D. Prabhakaran, S. Blundell, 原嘉昭, 渡辺忠孝
2. 発表標題 スピンプラストレート系コバルト酸化物CoTi205の弾性特性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦慧悟, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フェライトスピネルCdFe204の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takayanagi, T. Watanabe, F. Kirschner, D. Prabhakaran, S. Blundell, and Y. Hara
2. 発表標題 Ultrasound-Velocity Measurements in Spin-Frustrated Cobaltite CoTi205
3. 学会等名 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2019 (MMM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Suzuki, Y. Fukushima, Y. Takei, and T. Watanabe
2. 発表標題 Substitution Effects on Magnetism of Laves-Phase Iron Compound ZrFe2
3. 学会等名 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2019 (MMM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Miura, Y. Koga, Y. Sugaya, and T. Watanabe
2. 発表標題 Substitution Effects on Magnetism of Spin-Frustrated Chromite and Ferrite Spinel
3. 学会等名 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2019 (MMM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Tsujimura and T. Watanabe
2. 発表標題 Effects of Zn-Site Magnetic Substitution in Frustrated Chromite Spinel $ZnCr_2O_4$
3. 学会等名 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2019 (MMM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福島祥紘, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物 $Ti_{1-y}Fe_{2+y}$ と $Ti(Fe_{1-x}B_x)_2$ (B=Mn, Co) の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木敦智, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物 $ZrFe_2$ の磁性への Zr サイト置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古賀裕也, 渡辺忠孝
2. 発表標題 スピンプラストレート系スピネル $Zn(Cr_{1-x}Fe_x)_{204}$ のスピンガラス挙動
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻村史弥, 渡辺忠孝
2. 発表標題 クロムスピネル $ZnCr_{204}$ の磁性へのZnサイト置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田悠生, 渡辺忠孝
2. 発表標題 スピネル混晶 $Zn(Fe_{1-x}B_x)_{204}$ (B = Mn, Co)の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦慧悟, 渡辺忠孝
2. 発表標題 カドミウムスピネル $Cd_{204}$ (B = Cr, Fe)の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高柳和也, F. Kirschner, D. Prabhakaran, S. Blundell, 原嘉昭, 渡辺忠孝
2. 発表標題 スピンドラストレート系コバルト酸化物CoTi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> の超音波音速測定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高柳和也, 岡田竜一, F. Kirschner, D. Prabhakaran, S. Blundell, 原嘉昭, 渡辺忠孝
2. 発表標題 CoTi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> の超音波音速測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻村史弥, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> におけるZnサイトの磁性元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田悠生, 中川文吾, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フェライトスピネルZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦慧悟, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フェライトスピネルCdFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古賀裕也, 渡辺忠孝
2. 発表標題 スピネル混晶A(Cr <sub>1-x</sub> Fe <sub>x</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (A = Zn, Cd)の磁性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福島祥紘, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物TiFe <sub>2</sub> の元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田竜一, 渡辺忠孝, 富安啓輔
2. 発表標題 コバルト酸化物LaCoO <sub>3</sub> とLa(Co <sub>0.99</sub> Ni <sub>0.01</sub> )O <sub>3</sub> の弾性異常
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福島祥紘, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物TiFe <sub>2</sub> の遍歴磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井博隆, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物 ZrV <sub>2</sub> の超伝導・CDWへの元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武井優樹, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物ZrFe <sub>2</sub> の遍歴磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田悠生, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フェライトスピネルZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古賀裕也, 渡辺忠孝
2. 発表標題 スピネル混晶系 $\text{ACr}_2\text{O}_4$ (A = Zn, Cd)の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻村史弥, 渡辺忠孝
2. 発表標題 クロムスピネル $\text{ACr}_2\text{O}_4$ (A= Mn,Co)の磁性へのAサイト置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅谷雄士, 渡辺忠孝
2. 発表標題 カドミウムスピネル $\text{Cd}(\text{Cr}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{O}_4$ の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川文吾, 渡辺忠孝
2. 発表標題 コバルトスピネル $\text{ZnCo}_2\text{O}_4$ の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 草田隆良, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フラストレートスピネル $Zn(Cr_{1-x}Mn_x)_{204}$ の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Fukushima, H. Ishii, Y. Takei, S. Enomoto, M. Ogawa, M. Saito, T. Watanabe
2. 発表標題 Substitution effects on magnetism of Laves phase compounds $TiFe_2$ and $NbFe_2$
3. 学会等名 9th Joint European Magnetic Symposia (JEMS) Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Koga, R. Okada, S. Kobayashi, H. Yamada, T. Watanabe
2. 発表標題 Substitution effects on frustrated magnetism of chromite spinel $ACr_{204}$ ( $A = Zn$ and $Cd$ )
3. 学会等名 9th Joint European Magnetic Symposia (JEMS) Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Fujita, Y. Sugaya, T. Kusada, B. Nakagawa, H. Yamada, T. Watanabe
2. 発表標題 Effects of nonstoichiometry and substitution on frustrated magnetism of ferrite spinel $ZnFe_{204}$
3. 学会等名 9th Joint European Magnetic Symposia (JEMS) Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡田竜一, 渡辺忠孝, 富安啓輔
2. 発表標題 コバルト酸化物LaCoO <sub>3</sub> とLa(Co <sub>0.99</sub> Ni <sub>0.01</sub> )O <sub>3</sub> の超音波音速測定
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古賀裕也, 岡田竜一, 小林契汰, 山田隼人, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フラストレートスピネルZn(Cr <sub>0.7</sub> Fe <sub>0.3</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の単結晶作製
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田悠生, 菅谷雄士, 草田隆良, 中川文吾, 山田隼人, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フェライトスピネルZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への不定比性の効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅谷雄士, 渡辺忠孝
2. 発表標題 カドミウムクロムスピネルCdCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川文吾, 渡辺忠孝
2. 発表標題 コバルトスピネルZnCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> およびLiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 草田隆良, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フラストレートスピネルZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福島祥紘, 石井博隆, 武井優樹, 榎本蒼, 小川幹, 斎藤理貴, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物YMn <sub>2</sub> における磁性へのMnサイト置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井博隆, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物 ZrV <sub>2</sub> の超伝導・CDW転移への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武井優樹, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物 $Zr(Fe_{1-x}X_x)_2$ ( $X = Mn, Co$ )の磁性
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirotaka Ishii, Motoki Ogawa, Tadataka Watanabe
2. 発表標題 Element substitution effects on superconductivity and charge density wave of Laves compound $ZrV_2$
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryuichi Okada, Keisuke Tomiyasu, Tadataka Watanabe
2. 発表標題 Ultrasound velocity measurements in perovskite cobaltites $LaCoO_3$ and $La(Co_{0.99}Ni_{0.01})O_3$
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Takei, Sou Enomoto, Tadataka Watanabe
2. 発表標題 Doping effects on itinerant-electron magnetism of Laves compound $AFe_2$ ( $A = Ti$ and $Zr$ )
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuto Sugaya, Hayato Yamada, Tadataka Watanabe
2. 発表標題 Element substitution effects on magnetism of cadmium chromite spinel CdCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Bungo Nakagawa and Tadataka Watanabe
2. 発表標題 Magnetism of spinel cobaltite ACo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (A = Zn and Li)
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayoshi Kusada, Hayato Yamada, Tadataka Watanabe
2. 発表標題 Effects of element substitutions on frustrated magnetism of chromite spinel ZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎本蒼, 高瀬浩一, 高野良紀, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物TiFe <sub>2</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井博隆, 高瀬浩一, 高野良紀, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物ZrB <sub>2</sub> (B=V, Cr, Mn)の元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小川幹, 高瀬浩一, 高野良紀, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物HfV <sub>2</sub> の超伝導・構造相転移への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡田竜一, 渡辺忠孝, 富安啓輔
2. 発表標題 ペロブスカイト型酸化物LaCoO <sub>3</sub> とLa(Co <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> )O <sub>3</sub> の弾性異常
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林奨汰, 原嘉昭, J. Xu, B. Lake, 渡辺忠孝
2. 発表標題 擬一次元スピン・軌道鎖を有するバナジウム酸化物CaV <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の弾性異常
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武井優樹, 高野良紀, 高瀬浩一, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ラーベス化合物ZrFe <sub>2</sub> の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤勲也, J. W. Krizan, R. J. Cava, 原嘉昭, 渡辺忠孝
2. 発表標題 ボンドランダムネスを有するパイロクロア磁性体NaCaCo <sub>2</sub> F <sub>7</sub> の弾性異常
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川文吾, 村井亮太, 高瀬浩一, 高野良紀, 渡辺忠孝
2. 発表標題 コバルトスピネルZnCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> およびLiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅谷雄士, 高瀬浩一, 高野良紀, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フラストレートスピネルCd(Cr <sub>1-x</sub> V <sub>x</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 草田隆良, 高瀬浩一, 高野良紀, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フラストレートスピネルA(Cr <sub>1-x</sub> V <sub>x</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (A=Zn, Mg) の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田隼人, 小野拓海, 高野良紀, 高瀬浩一, 渡辺忠孝
2. 発表標題 フラストレートスピネルACr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (A = Zn, Cd) の磁性への元素置換効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017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

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			
米国	プリンストン大学	アイオワ州立大学	オークリッジ国立研究所	
英国	オックスフォード大学			
ドイツ	ベルリン・ヘルムホルツ研究所			