

令和 3 年 5 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05525

研究課題名(和文)局所空間反転対称性無きウラン化合物の超音波物性

研究課題名(英文)Ultrasonic Investigation of Uranium Compounds without Local Inversion Symmetry

研究代表者

柳澤 達也 (Yanagisawa, Tatsuya)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10456353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：空間反転対称性を破る渦状磁気構造(磁気トロイダル秩序)を示すウラン化合物(UNi4B)の弾性応答を超音波位相比較法を用いて極低温・強磁場領域まで精密に測定した。その結果、ハニカム構造の中心に存在するUサイトが磁気トロイダル秩序下においても常磁性状態を保ちつつ四極子自由度を有すること、磁場方向に対してこの電気四極子の応答が強い異方性を持つことをあきらかにした。また、極低温において20 Tを超える高磁場領域($H \parallel b$)に未解明の秩序相(V相)を新たに発見した。これらの結果は、本系の渦状磁気構造とスピンの再配置転移において電気四極子が重要な役割を果たしていることを強く示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場下で堅牢な電気四極子自由度を自在に制御できるようになれば、新たな量子メモリや、磁場に対して堅牢な量子デバイスなどへの応用が期待される。今回実証されたのはその基礎となる現象のため、今後はその物理をしっかりと構築することが重要である。また、本研究で採用した強磁場・極低温下における精密超音波測定の手法は様々な化合物に応用可能であり、磁気相図の構築から新奇な量子現象の機構解明に役立てることができる。

研究成果の概要(英文)：The elastic response of a uranium compound (UNi4B) exhibiting vortex-like magnetic ordering (magnetic toroidal dipolar ordering), which breaks the spatial inversion symmetry, has been precisely measured by using the ultrasonic phase-comparison method down to very low temperatures and high magnetic fields. We have succeeded in identifying the electric quadrupoles that maintain their degrees of freedom without ordering at the center of a magnetic vortex arrangement in uranium with a honeycomb structure. The response of the quadrupoles depends strongly on the direction of the magnetic field. We discover a new phase V appears at high magnetic fields and low temperatures for $H \parallel b$. We can conclude that the electric quadrupoles play an important role in the vortex-like magnetic structure of this system, modifying the spin-reorientation process as well.

研究分野：超音波電子物性

キーワード：強相間電子系 奇パリティ多極子 低温物性 磁性 超音波

1. 研究開始当初の背景

f 電子系をはじめとする強いスピン軌道相互作用を有する系では、全角運動量 J で記述される高次の多極子が低温の量子状態を支配することがあり、系の電子物性を記述するうえで不可欠な概念となっている。しかしながら、これまでの多極子の議論はそのほとんどが局在した磁性イオンと大局的な空間反転対称性を有する系に限られており、空間反転対称性が偶パリティを持つ多極子のみを扱っていた。研究開始当初は、空間反転対称性が保たれていない奇パリティの多極子の理論研究が盛んに進められていた。空間反転対称性が破れている電子系では、奇数次の結晶場を考慮した局所波動関数において、パリティが異なる軌道間の局所的な混成が許されるため、「奇パリティ多極子」が主役となる量子状態が理論的に予見されている。[1]その新しい物理描像に基づく基本学理の創出を目指すためには、奇パリティ多極子の実験的傍証を集めることが課題であった。

2. 研究の目的

空間反転対称性を持たない U 系の弾性応答を極低温・強磁場領域まで精密に測定すること自体が、 $5f$ 電子の基本物理描像の理解にとって必要である。その上で、ウラン化合物を舞台とした「奇パリティ多極子」の影響が弾性応答などのマクロ物性に現れるかどうかを検証する。

UNi₄B 本研究において中心的なテーマとして設定する UNi₄B は直方晶($Cmcm$, D_{2h}^{17} , No. 63)の結晶構造を持ち[2]、 $T_N = 20.4$ K で磁気秩序を示す[3]。過去の中性子回折実験では、上記の直方晶と非常に近い六方晶($P6/mmm$, D_{6h}^1 , No. 191)の結晶構造を仮定した磁気構造の解析が行われている。[4] T_N 以下の磁気構造は図 1 に示すような特異な構造が提案されており、直方晶 a 面内で三角格子を組む U のうち $2/3$ の U の磁気モーメントが六員環上で「渦状」に整列し、六員環中央の残り $1/3$ の U が常磁性を保って a 軸方向に 1 次元鎖を成す。奇パリティ多極子の観点からこの磁気構造を観ると、「強トロイダル秩序」として捉えることができ[5]、最近、その実験的傍証の一つとして、電流誘起の磁化が報告された[6]。このように UNi₄B は興味深い磁気秩序を示すが、UNi₄B はこれまでに弾性に関する報告が無く、本系が $T \sim 330$ mK で示す第二の相転移の秩序変数と併せて常磁性を保つ $1/3$ の U の極低温での基底状態もよくわかっていない。また、強磁場領域においてスピントロップに伴い生じる多段転移についても詳しく調べられていない状況であった。

URu₄Si₂ 重い電子系化合物 URu₄Si₂ は、本系が $T_0 = 17.5$ K で示す秩序変数・秩序波数共に未解明の「隠れた秩序(HO)」の解明を巡り、四半世紀に渡る当該分野の大きな謎の一つとして、精力的に研究されている。[7] 正方晶($ThCr_2Si_2$ 型 $I4/mmm$, No. 139)の結晶構造を有する本系は、隠れた秩序に於ける $B_{2g}(\Gamma_4)$ 対称性の結晶対称性の低下が報告されている。[8] 一方、結晶対称性の低下を伴わない隠れた秩序変数も提案されており、その有力な候補の一つとして $A_{1g}(\Gamma_2)$ 型の反強十六極子(AFH)秩序や、高次の奇パリティ多極子秩序のモデルがあげられている。[9] 特に AFH 秩序では、 c 面内の磁場印加によって誘起される下位の電気四極子モーメントにより、四極子感受率に異方性が生じることが予想されている。[9] これを検証するため、東北大学金属材料研究所の 28 T-CHM に半固定型の 1 軸回転機構を導入し、超音波測定装置を組み合わせて磁気異方性の検証に挑戦した。

3. 研究の方法

固体中に入射された超音波は弾性波として伝播し、結晶格子に局所的な歪みを誘起する。その局所歪みは電子の軌道自由度に由来し、同じ対称性を持つ異方的な局所電荷分布の「電気四極子」と結合する。すなわち超音波の音速を精密に測定することで、固体のばね定数である「弾性定数」がわかり、その温度・磁場変化は固体中の電子が持つ電気四極子自由度の感受率として理解できる。この「超音波位相比較法」は多極子の物理に対する実験手法としてこれまで物性物理学において重要な役割を演じ、特に日本国内でその技術が培われてきた。[10] 本研究は上記の化合物に超音波の手法を適用し、通常磁気測定では得難い「電気四極子」と「局所電荷揺らぎ」の観測、さらに電流印加による交差相関現象から奇パリティ多極子の可能性を検証することを目標にした。

法規制によりウラン化合物の国外輸出はできないため、本研究では、北海道大学、カリフォルニア大学、カレル大学で別々に育成・評価された複数のウラン化合物単結晶試料を用いて、それぞれ日本国内とヨーロッパにおいて極低温・強磁場実験を行った。具体的には、ドレスデン強磁場研究所のパルス磁石と ⁴He 冷凍機を組み合わせ $T \geq 1.5$ K, $H < 60$ T の領域、金属材料研究所の 28 T ハイブリッド マグネットと希釈冷凍機を組み合わせ $H \leq 28$ T, $T > 20$ mK の領域において超音波測定を行った。

4. 研究成果

(1) UNi₄B の磁場中弾性応答 [11]

本研究では位相比較法を用いて、これまで測定されていなかった弾性定数の測定を行った。図2に零磁場下におけるUNi₄Bの弾性定数の測定結果を示す。横波モード C_{66} (六方晶における Γ_5 対称性の歪み感受率に対応)は、常磁性相および秩序相内の両方において、温度に反比例するキュリーの的なソフト化を示す。しかしながら、これらのソフト化は過去に提案されている U^{3+} ($5f^3$: $J = 9/2$)の結晶場模型に基づく四極子感受率では説明できない。図3の $H = 0$ T と付されたデータ(下軸)はさらに極低温領域(0.04~1.0 K)において弾性定数 C_{66} の測定を行った結果を示す。常磁性状態から続く弾性定数 C_{66} のソフト化は $T^* \sim 330$ mK 付近でゆるやかに停止し、一定値に収束する振る舞いを示す。これは U^{4+} ($5f^2$: $J = 4$)の電子状態が存在していることを示し、横波超音波モード C_{66} が結晶内に誘起する格子歪み ε_{xy} (或いは回転 ω_{xy})と結合する電気四極子(或いは電気十六極子)の自由度を本系が有することを意味する。本研究ではこの弾性応答を局在電子模型で解析し、直方晶を想定した新たな結晶場基底状態模型とそこから得られるUの四極子-歪み相互作用係数、四極子間のサイト間相互作用係数を決定することに成功した。また、 T_N 以下において常磁性を保つ1/3のUがその縮退を極低温まで保持している、とする先行研究の磁気構造モデルの提案を支持する結果である。先行研究では T^* において比熱がピークを示すとの報告[12]があり、この比熱異常が相転移に由来するならばUが持つ多極子自由度の秩序化を示唆する。一方、六方晶よりも対称性を落とした直方晶を仮定した解析では、結晶場基底状態が ~ 875 mK程度の分裂幅を持つ擬縮退状態であると仮定すると、 T^* での弾性定数 C_{66} のソフト化の収束が再現される。この場合、比熱のピークの起源はショットキーとして理解できる。

図3の $T = 45$ mK と付されたデータ(上軸)は、温度を固定し C_{66} の磁場依存性を28 Tまで測定した結果である。ここでは磁場による履歴を示すために磁場掃引の上げ過程と下げ過程を同時に表示している。 $H_1 \sim 7$ Tと $H_2 \sim 20$ T付近に履歴を伴う2つの異常を示しており、一次相転移が起こっていることが判る。また、 $H_3 \sim 22$ Tに超音波吸収を伴う弾性定数の明確な「折れ」が現れた。これらの結果を、弱磁場領域で既に得られている弱磁場領域のデータと共に28 Tまで拡張した磁場-温度(H - T)相図としてまとめたものを図4に示す。II相として示されている相境界の低温部分は、過去のパルス磁場下における磁化測定から報告されているスピントロップ転移と一致する。[12] また、本研究では H_2 から H_3 の強磁場領域にこれまでに報告されていない新たな秩序相(V相)を定義した。[11] 図4の背景のカラープロットは弾性定数 C_{66} の絶対値の大小を表している。低温領域に弾性定数の小さい(軟化した)領域が存在するが、磁場を印加すると中間磁場で一度硬化し、10 T以上の領域で再び軟化することがわかる。これは強磁場領域で本系の四極子自由度が回復しており、本系の複雑な磁気相図の背景に四極子が少なからず影響していることを示唆している。

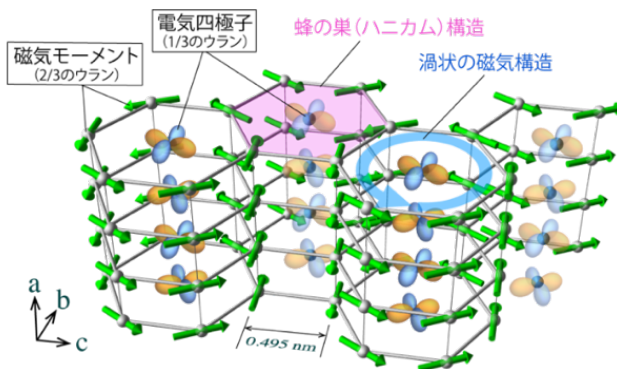


図1 UNi₄Bの結晶構造と磁気構造の概念図

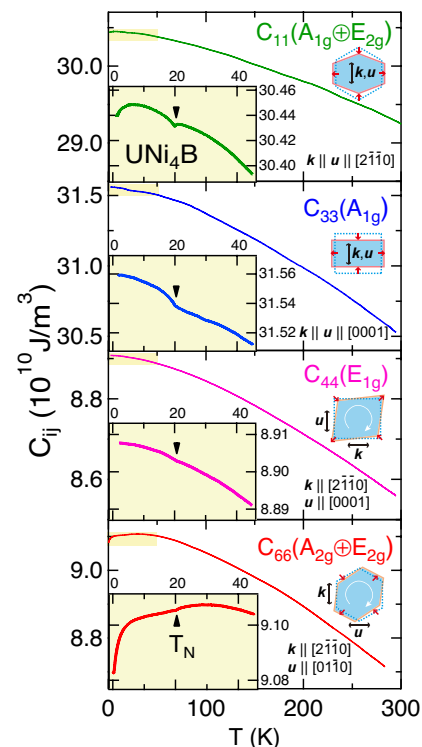


図2 UNi₄Bの零磁場における弾性定数の温度依存性

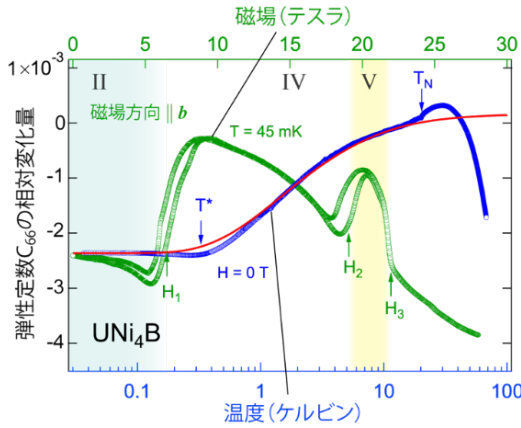


図3 UNi₄Bの弾性定数 C_{66} の零磁場における温度依存性（青：下軸）と45 mKにおける磁場依存性（緑：上軸）を同時に表示している。赤い曲線は局在電子模型を用いた電気四極子感受率による解析結果。

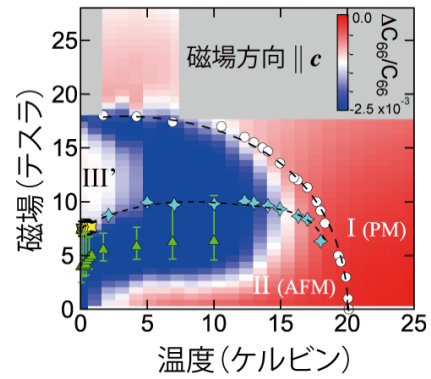


図4 UNi₄Bの磁場—温度相図 ($H \parallel c$) 背景の「赤～白～青」のグラデーションは弾性定数の「大～中～小（硬～軟）」の度合いを示す。

(2) UNi₄B の交差相関現象の検証

超音波実験により奇パリティ多極子秩序由来の交差相関現象の有無を検証するため、電流下での超音波測定を行った。図5に電流を b 軸に印加しながら超音波測定を行った結果（弾性定数 C_{66} の温度依存性の温度変化・電流依存性）を示す。この実験において100 mAの電流印加における電流密度は試料の断面積から、 $100 \text{ mA} / (1.96 \times 1.33 \text{ mm}^2) = 39 \text{ kA/m}^2$ と概算される。電流印加によって転移温度の上昇と低温ソフトの抑制が観られる。これらは図6の実験から発熱が主因であることがわかっている。電流印加により発熱した試料と温度計の間の温度勾配を排除するために、超流動液体ヘリウム内で同様の実験を行った結果、 $J \parallel c$ と $J \perp c$ の条件共に、電流印加の有無で比較したところ $10E-5$ の精度で変化は現れていない。本研究計画当初から超音波測定の測定手法を改良し測定精度を高めて電流誘起現象を探索してきたが、現状用いている単結晶試料と超音波測定の組み合わせでは「反転対称性無き結晶構造に起因する交差相関現象」は測定精度内で観測されないという結論に至った。

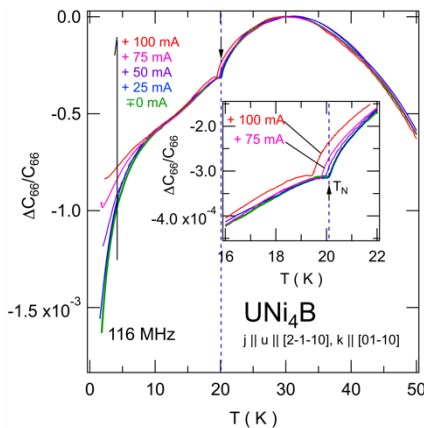


図5 UNi₄Bの弾性定数 C_{66} の電流下測定 $J \parallel b$

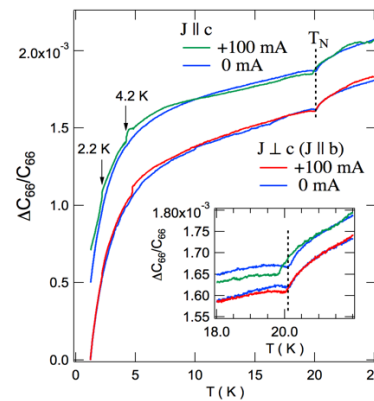


図6 UNi₄Bの弾性定数 C_{66} の温度依存性 $J \parallel c$ と $J \perp c$ の比較

(3) URu₂Si₂ の強磁場領域における格子不安定性の検証

図7に弾性定数 C_{66} の磁場依存性 ($H \parallel [110]$) を示す。縦軸は零磁場における弾性定数の相対変化であり、比較のために各温度のデータが重ならない様、縦方向にシフトして表示している。4.2 Kでは磁場印加と共に $3E-5$ 程度のゆるやかな硬化が観られ、降温に伴いその変化が顕著となっている。常伝導相におけるこの横波超音波の変化は、先行研究ではローレンツ力による横波超音波の変化として解釈されている。[14] 一方、最低温70 mKで5 T付近にみられる「折れ」のような振る舞いは超伝導相内での磁束の変化を捉えていると考えられる。また、昇磁過程と減磁過程でヒステリシスが生じているが、今のところ本質的なものかどうか原因はわかっていない。

次に、HO相内における四極子感受率の磁気異方性を静磁場(static)とパルス磁場(pulse)下で調べた結果を図8に示す。ドレスデン強磁場研究所で行った $H \leq 58 \text{ T}$ のパルス磁場で得られた弾性定数 C_{66} の磁場変化と比較すると、静磁場は概ねパルス磁場実験を再現している。静磁場下

における C_{66} の磁場変化を $H \parallel [100]$ と $H \parallel [110]$ で比較すると 28 T で $5E-5$ 程度の異方性が生じている。ここで、この異方性が非本質的な原因で生じている可能性について考察する。本系は正方晶であり、各種物理量に $H \perp [001]$ と $H \parallel [001]$ に大きな異方性があるため、結晶軸に対して磁場方向のアライメントがずれている場合、変化量が大きい a - c 面内の 2 回対称成分が容易に混ざる可能性がある。

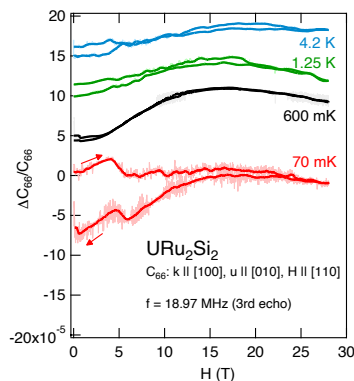


図7 URu₂Si₂の弾性定数 C_{66} の極低温における磁場依存性 $H \parallel [110]$

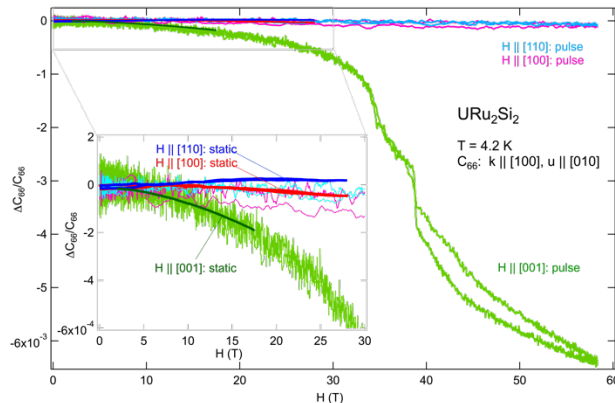


図8 URu₂Si₂の弾性定数 C_{66} の磁場依存性の比較 (静磁場 ≤ 28 T・パルス磁場 ≤ 58 T)

本研究では半固定型の一軸回転ステージを用いており、試料と冷凍機を極低温に保ったまま回転できない。磁場方向(試料)を回転する際は希釈冷凍機全体を一度常温に戻さなければならず、磁場方向に対する軸立てに $1-2^\circ$ 程度の誤差が生じ得る。このミスアライメントの影響を排除するため、将来的には低温でアライメントが可能なる 2 軸ゴニオメータを用いた追試実験を行う必要がある。加えて、本実験配置においては、ハミルトニアン of 回転不変性に由来する磁気トルクの影響も考慮する必要がある。これを逆説的に捉えると、HO 相内外でこの効果を調べることで強磁場を用いた磁気トルク実験の検証実験となり得る。これらを遂行するためには T_0 を跨ぐ広い温度範囲での実験が必要である。

総括

UNi₄B の超音波測定の結果から、トロイダル秩序下でも常磁性状態を保つ U サイトが四極子自由度をもち、磁場方向に対して四極子応答が強い異方性を持つことがあきらかとなった。これらは当初の目的とは異なるセレンディピティな研究成果であるが、複雑な磁気相図の背後に電気四極子の寄与が確かに存在することを示す重要な結果が得られた。今後、極低温・高磁場領域で新たに発見した秩序相の全容解明を目指す。磁場下で堅牢な多極子自由度を自在に制御できるようになれば、新たな量子メモリや、磁場に対して堅牢な量子デバイスなどへの応用が期待される。

URu₂Si₂ の強磁場領域における弾性応答の異方性の検証には、2 軸ゴニオメータを用いた強磁場実験が必須である。引き続き、東北大学金属材料研究所との共同研究で 25 T 無冷媒超伝導磁石を用いた検証実験を進めていく所存である。

参考文献

- [1] 楠瀬博明「スピンと軌道の電子論」 講談社 (2019), ISBN 4065169976.
- [2] Y. Haga *et al.*, Physica B **403**, 900-902 (2008).
- [3] J. A. Mydosh *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 1031 (1994).
- [4] S. A. M. Mentink *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 1031 (1994).
- [5] S. Hayami *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 024432 (2014).
- [6] H. Saito *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033702 (2018).
- [7] J. A. Mydosh and P. M. Oppeneer, Rev. Mod. Phys. **83**, 1301 (2011).
- [8] for example, S. C. Riggs *et al.*, Nature Comm. **6**, 6425 (2015).
- [9] H. Kusunose and H. Harima, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 084702 (2011).
- [10] 柳澤達也「超音波からみた多極子・ラットリング (重い電子系若手秋の学校講義ノート)」, 物性研究 **97**(4), 791-823 (2012).
- [11] T. Yanagisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 157201 (2021).
- [12] R. Movshovich *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 2065 (1999).
- [13] S. A. M. Mentink *et al.*, Phys. Rev. B **51**, 11567 (1995).
- [14] B. Wolf *et al.*, J. Low Temp. Phys., **94**, 307 (1994).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 T. Yanagisawa, H. Matsumori, H. Saito, H. Hidaka, H. Amitsuka, S. Nakamura, S. Awaji, D. I. Gorbunov, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, K. Uhlirova, M. Valiska, and V. Sechovsky	4. 巻 126
2. 論文標題 Electric quadrupolar contributions in the magnetic phases of UNi4B	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 57201 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.157201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hidaka Hiroyuki, Mizuuchi Kota, Hayasaka Eikai, Yanagisawa Tatsuya, Ohara Jun, Amitsuka Hiroshi	4. 巻 102
2. 論文標題 Helical magnetic ordering studied in single-crystalline GdBe13	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 157201 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.174408	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 Satoru Hamamoto, Yuina Kanai-Nakata, Hidenori Fujiwara, Kentaro Kuga, Takayuki Kiss, Atsushi Higashiya, Atsushi Yamasaki, Shin Imada, Arata Tanaka, Kenji Tamasaku, Makina Yabashi, Tetsuya Ishikawa, Hiroyuki Hidaka, Tatsuya Yanagisawa, Hiroshi Amitsuka, Akira Sekiyama	4. 巻 29
2. 論文標題 Linearly Polarized Hard X-Ray Photoemission Spectroscopy of PrBe13	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 012010 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.29.012010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hiroyuki Hidaka, Kota Mizuuchi, Tatsuya Yanagisawa, and Hiroshi Amitsuka	4. 巻 30
2. 論文標題 Magnetic Phase Diagram of Helical Magnet GdBe13	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011117 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Gotze, M. J. Pearce, P. A. Goddard, M. Jaime, M. B. Maple, K. Sasmal, T. Yanagisawa, A. McCollam, T. Khouri, P.-C. Ho, and J. Singleton	4. 巻 101
2. 論文標題 Unusual phase boundary of the magnetic-field-tuned valence transition in CeOs ₄ Sb ₁₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075102 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.075102	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 T. Yanagisawa, S. Mombetsu, H. Hidaka, H. Amitsuka, P. T. Cong, S. Yasin, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, K. Huang, N. Kanchanavatee, M. Janoschek, M. B. Maple, and D. Aoki	4. 巻 97
2. 論文標題 Search for multipolar instability in URu ₂ Si ₂ studied by ultrasonic measurements under pulsed magnetic field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155137(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.155137	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 Klara Uhlrova, Naoyuki Miura, Vladimir Tkac, Jan Prokleska, Maciej Chrobak, Zbigniew Tarnawski, Hiroyuki Hidaka, Tatsuya Yanagisawa, Vladimir Sechovsky, and Hiroshi Amitsuka	4. 巻 538
2. 論文標題 Superconductivity in single crystalline ThBe ₁₃ and LuBe ₁₃	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica B: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 516-518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2017.10.129	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 Hiroyuki Hidaka, Ryoma Nagata, Chihiro Tabata, Yusei Shimizu, Naoyuki Miura, Tatsuya Yanagisawa, and Hiroshi Amitsuka	4. 巻 87
2. 論文標題 Low-temperature x-ray crystal structure analysis of the cage-structured compounds MBe ₁₃ (M = La, Sm, and U)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114707(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.2.053603	査読の有無 無
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 M. Valiska, H. Saito, T. Yanagisawa, C. Tabata, H. Amitsuka, K. Uhlirova J. Prokleska, P. Proschek, J. Valenta, M. Misek, D. I. Gorbunov, J. Wosnitzer, and V. Sechovsky	4. 巻 98
2. 論文標題 Magnetoelastic phenomena in antiferromagnetic uranium intermetallics: The UAu ₂ Si ₂ case	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174439(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.174439	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 Chihiro Tabata, Yoshihiko Ihara, Shogo Shimmra, Naoyuki Miura, Hiroyuki Hidaka, Tatsuya Yanagisawa, and Hiroshi Amitsuka	4. 巻 87
2. 論文標題 Uncompensated Antiferromagnetic Ordering of UAu ₂ Si ₂ Studied by ²⁹ Si-NMR	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114707(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.114707	査読の有無 無
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 Saito Hiraku, Uenishi Kenta, Miura Naoyuki, Tabata Chihiro, Hidaka Hiroyuki, Yanagisawa Tatsuya, Amitsuka Hiroshi	4. 巻 87
2. 論文標題 Evidence of a New Current-Induced Magnetoelectric Effect in a Toroidal Magnetic Ordered State of UNi ₄ B	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033702(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.033702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件(うち招待講演 4件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 柳澤 達也
2. 発表標題 四極子感受率による拡張多極子の形成と秩序化の研究
3. 学会等名 ISSPワークショップ「量子物質研究の最近の進展と今後の展望」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuya Yanagisawa
2. 発表標題 Research on the Formation and Ordering of the Augmented Multipoles via Ultrasonic Measurements
3. 学会等名 Joint Symposium of School of Science & WPI-ICReDD (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuya Yanagisawa
2. 発表標題 Electric Quadrupolar Contributions in the Magnetic Phases of UNi4B
3. 学会等名 Topical meeting on Condensed-matter Chemistry on Actinides: The Kumatori meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村慎太郎, 淡路智, 柳澤達也, 齋藤猛敬, 松村武, 落合明
2. 発表標題 極低温強磁場領域におけるCeTeの多極子転移
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 村田怜也, 今布咲子, 金子佑真, 田端千紘, 中尾裕則, 齋藤開, 清水悠晴, 青木大, 日高宏之, 柳澤達也, 網塚浩
2. 発表標題 UNi4Bの共鳴X線散乱
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 Yoshito Mikami
2. 発表標題 Elastic Response of CeRh ₂ Si ₂ under Magnetic Field and Electric Current
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshito Mikami
2. 発表標題 Ultrasonic measurement on CeRh ₂ Si ₂ under magnetic field and electric current
3. 学会等名 J-Physics 2019 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryoya Murata
2. 発表標題 Resonant X-ray Scattering Study on UNi ₄ B
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryoya Murata
2. 発表標題 Revisiting the crystal and magnetic structures of UNi ₄ B
3. 学会等名 J-Physics 2019 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田怜也, 今布咲子, 田端千紘, 中尾裕則, 齋藤開, 清水悠晴, 青木大, 日高宏之, 柳澤達也, 網塚浩
2. 発表標題 UNi4Bの共鳴X線散乱
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 日高宏之, 水内康太, 柳澤達也, 網塚浩, 大原潤
2. 発表標題 GdBe13のヘリカル磁気秩序
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 T. Yanagisawa
2. 発表標題 Probing the 'Hidden Order' Phase in URu2Si2 by Means of Ultrasonic Measurements in Pulsed Magnetic Fields
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Yanagisawa
2. 発表標題 Anisotropic Elastic Response in the Hidden Order Phase of URu2Si2 under High Magnetic Fields
3. 学会等名 J-Physics2018 Summer School (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳澤達也
2. 発表標題 電流と格子回転・歪みによる複合共役場を用いた拡張多極子検出の試み
3. 学会等名 J-Physics: 多極子伝導系の物理 平成30年度領域全体会議(後半キックオフミーティング)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳澤達也
2. 発表標題 単サイト四極子近藤効果の傍証:(Y,Pr)Ir ₂ Zn ₂₀ の弾性応答
3. 学会等名 新学術領域研究J-Physics: C01トピカルミーティング 拡張多極子物性研究の現状と展望
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳澤達也
2. 発表標題 UAu ₂ Si ₂ の強磁場に於ける弾性特性
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 柳澤達也
2. 発表標題 トロイダル秩序物質 UNi ₄ B の超音波弾性応答
3. 学会等名 J-Physics トピカルミーティング「拡張多極子研究の進展と課題」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松盛泰明, 門別翔太, 齋藤開, 柳澤達也, 日高宏之, 網塚浩
2. 発表標題 UNi4Bのトロイダル磁気秩序における磁場中弾性応答 II
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuya Yanagisawa, Hiroaki MATSUMORI, Takeaki SAITO, Hiraku SAITO, Hiroyuki HIDAKA and Hiroshi AMITSUKA
2. 発表標題 Elastic Response of the Vortices-type Magnetic Order in UNi4B
3. 学会等名 J-Physics 2017 International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳澤達也, 齋藤開, 日高宏之, 網塚浩, 中村慎太郎, 淡路智, Denis Gorbunov, Sergei Zherlitsyn, Jochen Wosnitza, Klara Uhliova, Michal Valiska, Vladimir Sechovsky
2. 発表標題 UNi4Bの極低温・強磁場における超音波弾性応答
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 柳澤達也
2. 発表標題 パルス強磁場下超音波測定による URu2Si2 における多極子不安定性の探索
3. 学会等名 J-Physics:多極子伝導系の物理 平成 29 年度領域全体会議
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

報道関連情報、アウトリーチ活動情報:
(1)科学新聞 第四面記事: 2021年5月21日
「磁気渦中の電気四極子 自由度保ちながら存在新たな量子デバイス実現期待 北大・東北大など観測」
(2)EMFL(欧州強磁場研究所) Newsletter 2021 No.1 の表紙と研究ハイライト記事: 2021年5月4日
https://emfl.eu/emflwebsite/wp-content/uploads/2021/05/emfl_newsletter_n1_21_web.pdf
(3)MGML(MATERIALS GROWTH & MEASUREMENT LABORATORY) NEWS: 2021年5月6日
“MGML and HLD user project smooths the path to the new quantum device”
Klara Uhlirova, Tatsuya Yanagisawa
<https://mgml.eu/news/2021/new-quantum-information-device>
(4)Optronics Onlineニュース: 2021年04月15日
<https://optronics-media.com/news/20210415/72854/>
北大ら、磁気渦の中心で揺らぐ電気四極子を観測

ホームページ:
Jマテリアル研究室ホームページ
<http://phys.sci.hokudai.ac.jp/LABS/kyokutei/vlt/>
Jマテリアル研究室ホームページ(超音波グループ)
<http://sonicbangs.sci.hokudai.ac.jp/yanagisawa/>

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
連携研究者	速水 賢 (Hayami Satoru) (20776546)	東京大学・大学院工学研究科・講師 (12601)	

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1件

国際研究集会	開催年
国際研究集会 反転対称無き系における多極子応答	2018年～2018年

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			
ドイツ	ドレスデン強磁場研究所	ドレスデン工科大学		
チェコ	カレル大学数物理学科			
アメリカ合衆国	カリフォルニア大学サンディエゴ校物理学科			