

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03726

研究課題名（和文）一軸歪みを利用した強磁性超伝導体の発現機構の微視的解明

研究課題名（英文）Microscopic investigation of ferromagnetic superconductivity under uniaxial stress

研究代表者

徳永 陽（Tokunaga, Yo）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：00354902

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）：本研究では、ウランを含む化合物で出現する強磁性超伝導を舞台に、磁気揺らぎによるスピン三重項超伝導の発現機構の解明をNMR法を用いて行った。73Ge同位体濃度を濃縮したURhGe単結晶を育成し、一軸圧下で73Ge核NMR測定を実施した。その結果、一軸圧力印加に伴う物質中の内部磁場、電場勾配及び磁気的な揺らぎの変化を明らかにすることが出来た。さらに本研究では同じウラン系超伝導体UTe2においても、単結晶NMR測定を世界に先駆けて実施し、この物質が超伝導を示す直前の温度領域において、電子系に異常に遅い揺らぎが出現していることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン三重項超伝導は、トポロジカル超伝導がバルクで実現する系として、次世代の量子コンピュータへの応用が強く期待されている。本研究を通じて、スピン三重項超伝導を示すウラン系強磁性超伝導体の磁気揺らぎの性質について、その共通点と物質ごとの個性が明らかになった。これらの情報は、今後スピン三重項超伝導の理論モデルを構築する上でも、極めて重要である。また今回、希釈冷凍機温度で一軸圧下でのNMR測定に成功したこと、NMR研究の可能性がさらに広がった。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the mechanism of spin-triplet superconductivity on uranium-based ferromagnetic superconductors using NMR techniques. We have prepared 73Ge-enriched single crystal of URhGe, and performed 73Ge-NMR measurement under uniaxial stress. The experiment have revealed successive changes of internal field, electronic field gradient, and magnetic spin fluctuations with applying uniaxial stress. Furthermore, we have conducted NMR experiments on a newly-discovered uranium-based superconductor UTe2, and detected the development of extremely slow electronic fluctuations in the normal state of UTe2.

研究分野：固体物理

キーワード：スピン三重項超伝導 ウラン系強磁性超伝導体 核磁気共鳴

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導は、2つの電子が何らかの引力によって電子対(Cooper pair)を形成し、ボゾン化することで出現する。超伝導の発現機構の解明においては、この電子対の引力の起源を同定することが重要な鍵となる。一般に電子対のスピン対称性や空間対称性などの情報は、その同定の間接的な手掛かりとなるが、最も直接的な方法は電子対の結合力の強弱と直接関連する揺らぎを見出すことである。実際、金属や合金における従来型の超伝導体では、転移温度に対する同位体効果の発見が、超伝導機構を解明する決定的な手がかりとなった。同位体効果とは化合物の構成元素をその同位体に置き換えることで、格子振動(フォノン)の揺らぎの振動数が変化し、それに相対して超伝導の転移温度も変化することを見出したものである。まさに従来型の超伝導が電子-フォノン機構によることを明確に示した実験と言える。

一方、重い電子系の超伝導体や高温超伝導体といった、いわゆる強相関電子系の超伝導では、同位体効果に相当するような実験はまだ存在していない。いずれの超伝導も磁気相の近傍に位置することから、フォノンではなく、磁気的な揺らぎを媒介とした非従来型の新しい超伝導の機構が有力視されている。

### 2. 研究の目的

本研究は、ウランを含む化合物で出現する強磁性超伝導を舞台に、磁気揺らぎによるスピン三重項超伝導の発現機構の解明を行うことを目的とする。強磁性と超伝導がミクロに共存する強磁性超伝導は、磁気揺らぎを媒介とする非BCS型の新しい超伝導機構の存在を直感的に示している。さらに2018年の1月には、そのうちの一つURhGeにおいて、結晶に一軸的な圧力(歪み)を印加することで、超伝導転移温度  $T_c$  が最大で約2.5倍も上昇することが発見された。また同年11月には  $T_c$  が1.6Kと、より高い超伝導転移温度を持つウラン系超伝導体  $UTe_2$  の発見が報告された。本研究ではこれらの物質において核磁気共鳴(NMR)実験を行い、強磁性超伝導体における磁気揺らぎと超伝導の相関を調べた。

### 3. 研究の方法

本研究では、スピン三重項超伝導の候補物質の中でも特にユニークな超伝導特性を持つ、ウラン系超伝導体URhGe及び $UTe_2$ を舞台に超伝導機構の解明を行なった。

本研究では、物質内の磁場揺らぎの微小な変化をいかに正確に測定するかという点が重要となるため、NMRで観測可能な同位体核の濃縮を行なった単結晶を作成し、実験を行った。URhGeについては $^{73}\text{Ge}$ 同位体濃度を自然存在比の7.7%から90%以上に濃縮し、 $^{73}\text{Ge}$ 核でのNMR測定を実施した。また $UTe_2$ については、 $^{125}\text{Te}$ 同位体濃度を7.0%から90%以上に濃縮し、 $^{125}\text{Te}$ 核でのNMR測定を行なった。NMRの最大の特徴は、物質内のある特定の場所(共鳴を起こさせる原子核位置)での微小な内部磁場の変化を高精度に測定できる点にある。さらにその動的な変化(=揺らぎ)にも極めて敏感である。本研究ではNMRスペクトルの測定から内部磁場や電場勾配といった電子系の静的性質を、核磁気緩和率の測定からその動的性質を探った。

一軸圧の発生に関しては、一軸アンビル型のセルを用い、それを希釈冷凍機に組み込んで実験を行なった(図1)。同装置はアンビルに直結するベローズ内のHeガス圧力を調整することで、1K以下の希釈冷凍機温度で一軸圧を連続的に変化させることが出来る。単結晶のb面をセル内で水平になるように設置し、NMRコイルを側面に直接巻きつけることでフィリングファクターを最大化し、測定感度を上げて測定を行なった(図2)。この時、一軸圧は結晶のb軸方向に平行に印加されている。

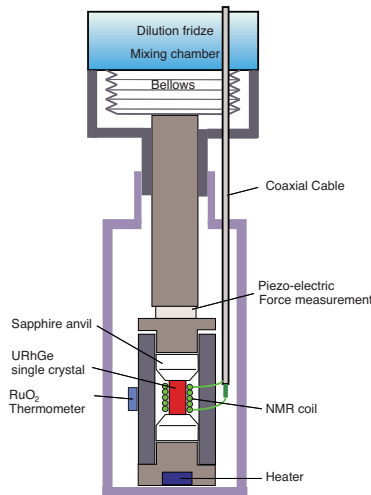


図1: 一軸圧下 NMR 測定システム概略図

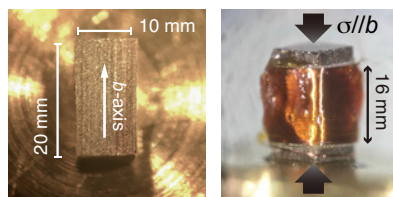


図2:(左)URhGe単結晶(右)NMR用コイル。矢印は一軸圧印加方向

## 4. 研究成果

### (1) URhGe の一軸圧下 NMR 測定

図 3 に 300mK の強磁性相内において測定されたゼロ磁場 NMR スペクトルの一軸圧依存性を示す. 一軸圧の増加とともに NMR ピーク位置が低周波側にシフト行く様子が見取れる. さらに圧力の増加に伴い各ピークの線幅も徐々に増大している. これらのスペクトルの一軸圧力依存性を解析することで, Ge 原子核位置での内部磁場及び電場勾配について, 以下の結論が得られた.

(a) 結晶に一軸的な歪みを与えることで, Ge サイトの内部磁場が大きく減少していく. この内部磁場の現象はウランの 5f 電子の磁気モーメントに起因すると考えられる. 一方, 電場勾配の変化は, 内部磁場の変化に比べて小さかった. この結果はバンド計算の結果とも一致する.

(b) 一軸圧力の印加に伴う線幅の増大は, 歪みの増大とともに, 物質内部に圧力分布が生じていることを意味している. 今回の実験では特に 0.5 GPa 付近から圧力分布が急激に増大していることが分かった. これらの結果は, 磁化率や比熱などの巨視的測定によって得られたデータを解釈する際にも, 高圧下ではこの結晶内部の圧力分布を十分に考慮することが必要であることを示している.

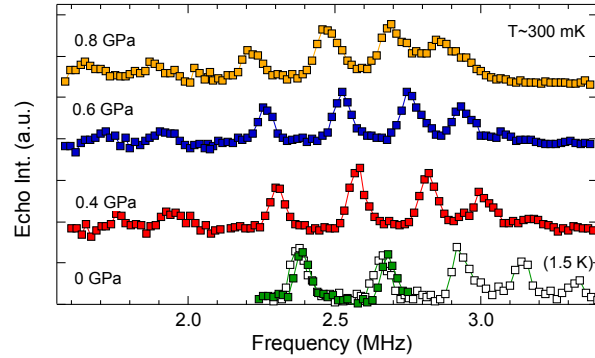


図 3: 300mK の強磁性相内において測定されたゼロ磁場 NMR スペクトルの一軸圧依存性

本研究ではさらに NMR スピン-スピン緩和時間( $T_2$ )の測定も行ない, 電子系の磁気揺らぎの特性を調べた. 測定は 1.4K 以下温度領域で, 一軸圧を 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 GPa と変えながら測定を行なった. 測定を行なったすべての温度, 圧力領域において, スピンエコーの横緩和過程 (Spin-echo decay)は単一のローレンス関数で Fit できることを確認した. Fitting からその時定数  $T_2$  を求めたところ, 少なくとも 1.0GP までの圧力範囲では,  $T_2$  の大きな変化は観測されなかった. このことは物質内のスピン揺らぎのうち, 少なくとも核の量子化軸方向 (結晶の c 軸方向)の揺らぎに関しては, 一軸圧の印加に伴う大きなエネルギーの変化はないこと, 従って, 結晶の b 軸方向の揺らぎの増大が, 一軸圧下の超伝導の転移温度の増大の起源である可能性を示唆している.

### (2) UTe<sub>2</sub> における単結晶 NMR 測定

図 4(a)に UTe<sub>2</sub> 単結晶試料で測定された NMR スペクトルを示す. UTe<sub>2</sub> は直方晶系の結晶構造(空間群 *Immm*)を持ち, 単位胞内に 4j (Te1) と 4h (Te2)という 2つの Te サイトを持つ. それに対応して NMR スペクトルにおいても各磁場方向において Te1 および Te2 サイトに対応する二つのピークが観測された. ピークはどの磁場方向でもシャープであり, 結晶の純良性が確認された. 次に観測された NMR 信号を用いて, <sup>125</sup>Te 核スピンのスピン-格子緩和時間及びスピン-スピン緩和時間を測定した (図 4(b)). 異なる磁場方向で観測した  $1/T_1$  の温度依存性から, 3つの結晶軸方向について磁気揺らぎの異方性を評価した. その結果, 磁化容易軸である a 軸方向の揺らぎが最大となっているが, c 軸方向の揺らぎも低温である程度増大していることが示された. 強い一軸的な磁気揺らぎを持つ UCoGe の場合と比較して, UTe<sub>2</sub> の磁気揺らぎはやや弱い一軸性を持つことが明らかになった.

さらに今回の研究では低温の 20 K 以下で磁場を a 軸方向に印加した際, MHz 以下という電子系としては非常に低い周波数を持った遅い揺らぎが, 物質が超伝導を示す直前の温度領域で出現していることを見出した. このような電子系の遅い揺らぎは, 通常の超伝導体では見られないものであり, UTe<sub>2</sub> の低温の電子状態が, 何らかの長距離相関が発達した特異な状態であることを強く示唆している. スピン三重項超伝導の発現のメカニズムにおいて, この遅い揺らぎの出現がど

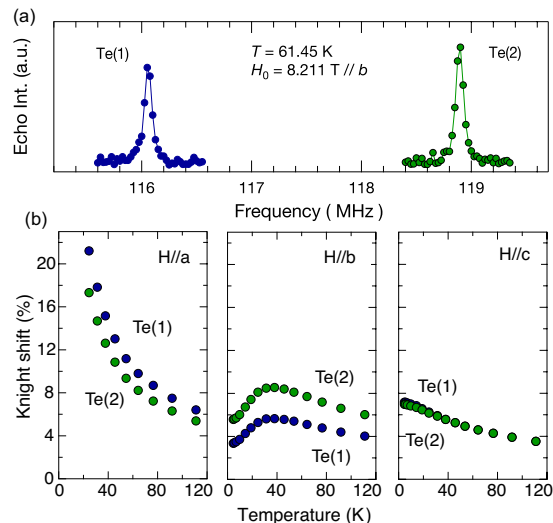


図 4: (a) UTe<sub>2</sub> における <sup>125</sup>Te-NMR スペクトル (b) 各磁場方向におけるスピン-格子緩和率 ( $1/T_1$ )の温度依存性

のような意味を持つのか、今後明らかにしていく必要がある。

以上を総括すると、本研究では当初の計画の通り、 $^{73}\text{Ge}$  同位体濃度を濃縮した URhGe 単結晶を育成し、一軸圧下で  $^{73}\text{Ge}$  核 NMR 測定を実施した。その結果、一軸圧力印加に伴う物質中の内部磁場、電場勾配及び磁気的な揺らぎの変化を明らかにすることが出来た。さらに本研究の開始直前に発見された同じウラン系強磁性超伝導体  $\text{UTe}_2$  においても、研究代表者と分担者の連携により、単結晶 NMR 測定を世界に先駆けて実施することが出来た。その成果は国際的に大きな注目を集め、原著論文は日本物理学会英文誌 JPSJ の 2020 年度の最多引用回数論文 TOP10 の 1 つに選ばれた。

ウラン系強磁性超伝導体の低温および磁場中での磁気揺らぎの特性は、当初の予想を超えて複雑であり、これがこの系の特異な超伝導性を理解する鍵になると考えられている。本研究を通じて、ウラン系強磁性超伝導体の磁気揺らぎの性質について、その共通点と物質ごとの個性が明らかになってきた。これらの情報は、今後スピン三重項超伝導の理論モデルを構築する上でも、極めて重要となる。また今回、希釈冷凍機温度で一軸圧下での NMR 測定に成功したことで、今後の NMR 研究の可能性が更に広がった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tokunaga Yo, Aoki Dai, Mayaffre Hadrien, Kremer Steffen, Julien Marc-Henri, Berthier Claude, Horvatic Mladen, Sakai Hironori, Kambe Shinsaku, Hattori Taisuke, Araki Shingo	4. 巻 30
2. 論文標題 Field-angular Dependence of Pairing Interaction in URhGe: Comparison with UCoGe	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc	6. 最初と最後の頁 011037_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011037	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 Shimizu Yusei, Miyake Atsushi, Maurya Arvind, Honda Fuminori, Nakamura Ai, Sato Yoshiki J., Li Dexin, Homma Yoshiya, Yokoyama Makoto, Tokunaga Yo, Tokunaga Masashi, Aoki Dai	4. 巻 102
2. 論文標題 Strong magnetic anisotropy and unusual magnetic field reinforced phase in URhSn with a quasi-kagome structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134411_1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.134411	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 Lesseux G. G., Sakai H., Hattori T., Tokunaga Y., Kambe S., Kuhns P. L., Reyes A. P., Thompson J. D., Pagliuso P. G., Urbano R. R.	4. 巻 101
2. 論文標題 Orbitally defined field-induced electronic state in a Kondo lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165111_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.101.165111	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 Sakai H., Matsumoto Y., Haga Y., Tokunaga Y., Kambe S.	4. 巻 103
2. 論文標題 Universal scaling behavior under pressure in the heavy-fermion antiferromagnet CeRh <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> : Si <sub>29</sub> NMR study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085114_1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.085114	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 Tokunaga Yo, Sakai Hironori, Kambe Shinsaku, Hattori Taisuke, Higa Nonoka, Nakamine Genki, Kitagawa Shunsaku, Ishida Kenji, Nakamura Ai, Shimizu Yusei, Homma Yoshiya, Li DeXin, Honda Fuminori, Aoki Dai	4. 巻 88
2. 論文標題 125Te-NMR Study on a Single Crystal of Heavy Fermion Superconductor UTe2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 073701_1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.073701	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 Nakamine Genki, Kitagawa Shunsaku, Ishida Kenji, Tokunaga Yo, Sakai Hironori, Kambe Shinsaku, Nakamura Ai, Shimizu Yusei, Homma Yoshiya, Li Dexin, Honda Fuminori, Aoki Dai	4. 巻 88
2. 論文標題 Superconducting Properties of Heavy Fermion UTe2 Revealed by 125Te-nuclear Magnetic Resonance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 113703_1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.113703	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 Tokunaga Yo, Sakai Hironori, Kambe Shinsaku, Haga Yoshinori, Tokiwa Yoshifumi, Opletal Petr, Fujibayashi Hiroki, Kinjo Katsuki, Kitagawa Shunsaku, Ishida Kenji, Nakamura Ai, Shimizu Yusei, Homma Yoshiya, Li Dexin, Honda Fuminori, Aoki Dai	4. 巻 91
2. 論文標題 Slow Electronic Dynamics in the Paramagnetic State of UTe2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 023707_1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.91.023707	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 Nakamine Genki, Kinjo Katsuki, Kitagawa Shunsaku, Ishida Kenji, Tokunaga Yo, Sakai Hironori, Kambe Shinsaku, Nakamura Ai, Shimizu Yusei, Homma Yoshiya, Li Dexin, Honda Fuminori, Aoki Dai	4. 巻 90
2. 論文標題 Inhomogeneous Superconducting State Probed by 125Te NMR on UTe2	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064709~064709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.064709	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 Haga Y, Opletal P, Tokiwa Y, Yamamoto E, Tokunaga Y, Kambe S, Sakai H	4. 巻 34
2. 論文標題 Effect of uranium deficiency on normal and superconducting properties in unconventional superconductor UTe <sub>2</sub>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 175601 ~ 175601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648x/ac5201	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 Aoki Dai, Kimata Motoi, Sato Yoshiaki J., Knebel Georg, Honda Fuminori, Nakamura Ai, Li Dexin, Homma Yoshiya, Shimizu Yusei, Knafo William, Braithwaite Daniel, Valiska Michal, Pourret Alexandre, Brison Jean-Pascal, Flouquet Jacques	4. 巻 90
2. 論文標題 Field-Induced Superconductivity near the Superconducting Critical Pressure in UTe <sub>2</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074705 ~ 074705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.90.074705	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 Li Dexin, Nakamura Ai, Honda Fuminori, Sato Yoshiaki J., Homma Yoshiya, Shimizu Yusei, Ishizuka Jun, Yanase Youichi, Knebel Georg, Flouquet Jacques, Aoki Dai	4. 巻 90
2. 論文標題 Magnetic Properties under Pressure in Novel Spin-Triplet Superconductor UTe <sub>2</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 073703 ~ 073703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.073703	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 徳永 陽
2. 発表標題 強磁性超伝導体URhGeにおける一軸圧下NMR測定
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yo Tokunaga
2. 発表標題 NMR Study of Magnetic Fluctuations in Heavy Fermion Superconductor UTe2
3. 学会等名 Yo Tokunaga, 合同国際研究会 GIMRT-REMAS2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yo Tokunaga
2. 発表標題 Low-energy magnetic excitations in UTe2
3. 学会等名 UTe2 online workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳永 陽
2. 発表標題 新奇重い電子超伝導体UTe2の研究の現状: NMR による磁気励起
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳永 陽
2. 発表標題 NMR study of magnetic fluctuations in UTe2
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Yo Tokunaga
2. 発表標題 Spin Fluctuations and Superconductivity in Uranium-based Ferromagnetic Superconductors
3. 学会等名 SCES2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳永陽, 青木大, Daniel Braithwaite, Georg Knebel, Jean-Pascal Brison, Alexandre Pourret, Gerard Lapertot, Qun Niu, Michal Valiska, Jacques Flouquet, 酒井宏典, 神戸振作
2. 発表標題 一軸歪みを利用した強磁性超伝導体URhGeのNMR研究
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 徳永陽, 酒井宏典, 神戸振作, 服部泰佑, 比嘉野乃花, 仲嶺元輝, 北川俊作, 石田憲二, 仲村愛, 清水悠晴, 李徳新, 本間佳哉, 本多史憲, 青木大
2. 発表標題 125Te-NMRによる新奇ウラン系超伝導体UTe2の磁気揺らぎの研究
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 徳永陽, 酒井宏典, 神戸振作, P. Opletal, 常盤欣文, 芳賀芳範, 仲嶺元氣, 藤林裕己, 金城克樹, 北川俊作, 石田憲二, 佐藤芳樹, 仲村愛, 清水悠晴, 李徳新, 本間佳哉, 本多史憲, 青木大
2. 発表標題 NMRによるUTe2の磁気揺らぎの研究
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 徳永陽, 酒井宏典, 神戸振作, P. Opletal, 常盤欣文, 芳賀芳範, 藤林裕己, 金城克樹, 北川俊作, 石田憲二, 佐藤芳樹, 仲村愛, 清水悠晴, 李徳新, 本間佳哉, 本多史憲, 青木大
2. 発表標題 UTe2の常伝導相におけるゆらぎの研究
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Aoki
2. 発表標題 Multiple superconducting phases and field induced phenomena in UTe2
3. 学会等名 Chirality, Topology, and Unconventional Superconductivity in Sr2RuO4 and UTe2 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Aoki
2. 発表標題 Multiple superconducting phases and field-induced superconductivity under pressure in UTe2
3. 学会等名 SCES2020/2021 (招待講演) (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	青木 大  (Aoki Dai)  (30359541)	東北大学・金属材料研究所・教授    (11301)	

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			
フランス	CEA研究所	LNCMI 研究所		