

# 第3回強磁場フォーラムフロンティア奨励賞を受賞して

附属国際超強磁場科学研究施設 三宅 厚志

この度、2021年12月に第3回強磁場フォーラムフロンティア奨励賞を受賞する栄誉に恵まれました。この賞は日本の研究機関で強磁場に関連した研究において、優れた成果をあげ、強磁場分野の発展に貢献した若手研究者に与えられる賞です。受賞対象は、「磁場に依存しない温度計の開発によるウラン系超伝導体におけるメタ磁性転移と超伝導の研究」で、論文[1,2,3]に関する研究が評価されたものです。徳永先生を始めとする共同研究者、ならびに日頃からお世話になっている附属国際超強磁場科学研究施設の皆様に誠に感謝しております。

研究対象であるウラン系超伝導体は  $UTe_2$  という「重い電子系」物質で、2018年末に超伝導転移が発見されました。発見当初からスピン3重項かつカイラル超伝導が実現している可能性が指摘され、世界的な競争が繰り広げられています。共同研究者であるCEA グルノーブルの Jacques Flouquet 博士と  $UTe_2$  の試料提供者である東北大青木大教授とは、私がCEA グルノーブルにポスドクとして彼らの研究室に所属していた頃から、長年共同研究を展開してきました。そのポスドク時代のテーマの一つが  $UTe_2$  に繋がる強磁性超伝導  $URhGe$  の磁場誘起超伝導でした。

$UTe_2$  はパウリ極限を超える超伝導臨界磁場を持ち、通常の超伝導発現機構では説明できないことが指摘されました [4, 5]。すでに  $UTe_2$  の超伝導発見者 Ran、Butch たちによって、メタ磁性転移が発見されたという情報も漏れ聞こえてきており、急いで実験を行い(Shinkansen - TGV mode)、確かに  $H_m \sim 35$  T で  $0.5 \mu B$  もの大きな磁化の跳びを伴うメタ磁性転移を観測しました [1]。さらに、様々な温度で磁化測定を行い、熱力学的な関係式から、電子比熱係数が  $H_m$  に向かい増大することを見出しました。平行して、フランスの元同僚達によって、 $H_m$  で磁気抵抗が4倍程度大きくなること、 $H_m$  に向かい  $T_c$  が増大し、 $H_m$  で超伝導が突然消失することなどが見出され、Journal of the Physical Society of Japan 誌にこれら3論文は連番で掲載されました[1,6,7]。その後、同所の今城氏、小濱所員らによるパルス磁場中での比熱測定により、電子比熱係数が確かに増大することを見出され、超伝導が磁場

中で増強されていることと関連していることが分かりました[8]。ちなみに、JPSJの2019年度高被引用文献Top10に上記3論文[1,6,7]を含む  $UTe_2$  関連論文6報が入ったことから、この物質の注目度の高さ、競争の激しさがお分かり頂けると思います。

世界に先駆けてメタ磁性転移発見の報告は出来たのですが、文献[1]では等温過程を仮定した解析を行っており、その定量性に不安がありました。例えば、磁気抵抗から求められた相図[6]と我々の結果[1]に不一致が見られました。パルス磁場中での測定では、磁場掃引が早いために試料が断熱条件に近く、試料温度が磁場で変化する磁気熱量効果(MCE)が問題になることが知られていました。そこで、より定量的な解析のためには、磁化の磁場・温度変化を同時に評価することが不可欠でした。ちょうど、磁場効果の影響の少ないキャパシタンス温度計の開発に取り組んでおり、 $UTe_2$  の磁化とMCEの同時測定に着手しました。そのための工夫は極簡単で、通常使用している磁化プローブ用の試料ホルダーに同軸ケーブル2本導入するだけでした。

「キャパシタンス温度計」のアイデアは  $UTe_2$  とは全く異なる物質を対象に行った共同利用を通じて生まれました。その経緯を簡単に紹介します。東大新領域の木村健太助教とマルチフェロイック物質を対象に、パルス強磁場中での誘電率測定手法を確立しました[2]。これらの系では電気磁気効果を通じて、誘電率に顕著な磁場変化が見られます。逆に、非磁性の誘電体を使用すれば、誘電率の磁場変化は小さくて磁場較正が不要な「磁場に依存しない温度計」として使えるのではないかと考えました。このアイデアは徳永先生と共同利用に来ていた徳永研OBの木原工氏(現岡山山大)にも評価され、開発に取り組むことになりました。文献を検索すると、同様の取り組みはすでに報告がありましたが、60 T 級までの磁場効果の報告はありませんでした。非磁性強誘電体試料( $KTa_xNb_{1-x}O_3$ , KTN)を合成されていたNIMSの橋信氏に試料提供を依頼し、キャパシタンス温度計の開発に着手しました。様々な温度で60 Tまでの誘電率の磁場依存性を測定し、予想通り誘電率がほとんど磁場変化しないことを確認し、磁場較正の不要な温度計としてMCE測定にも成功しました[2]。その後、橋氏

から KTN 合成法のレシピを詳しく教えて頂き、自分でも KTN を合成できるようになりました。組成比を変えることで、誘電率の大きな温度依存性を示す領域を制御できるのがポイントです。

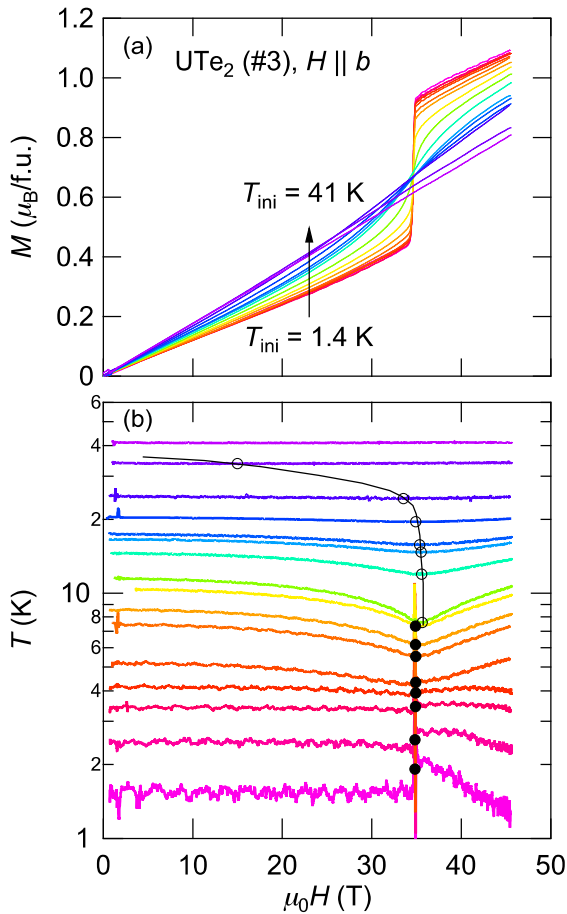


図 1.  $H||b$ における  $UTe_2$ の(a)磁化、(b)試料温度の磁場依存性 [3]. (b)図の黒丸は 1 次のメタ磁性転移、白丸はクロスオーバーに対応する。

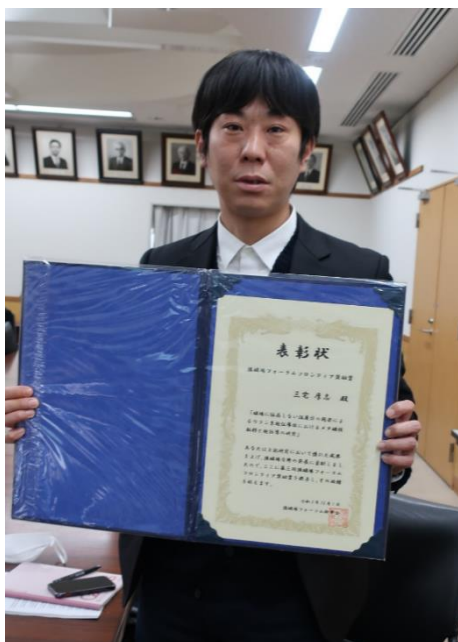
この温度計を試料に貼り付け、その誘電率と試料の磁化を同時に測定することで、図 1 に示すように  $UTe_2$  の磁化と試料温度を同時に測定することに成功しました。35 T 付近のメタ磁性転移に伴い、試料温度が急激に変化します。一次転移であることの証左です。さらに、4.2 K より高温では、 $H_m$  に向かい試料温度が減少することを見出しました。このことから、ヘリウムガス中では、断熱条件に近い環境で実験が行われていること、磁場中でエントロピーが増大していることが分かりました。このように、磁化の温度、磁場変化を評価することが出来、より定量的に  $UTe_2$  の磁場温度相図[図 1(b)黒丸、白丸]、電子比熱係数の磁場依存性を見積もることが出来ました[3]。  $UTe_2$  の大きな謎

として、 $b$  軸から  $c$  軸に傾けて磁場を印加すると、磁場 [011]方向付近で  $H_m$ 以上で超伝導が再び現れることが知られています[9]。これは  $H_m$ で超伝導が消失する  $b$  軸方向と対照的です。磁場[011]方向に対しても同様の磁化と MCE の同時測定を行いました。その結果、 $b$  軸では電子比熱係数が不連続に減少するのに対して、[011]方向では増大することを明らかにしました[3]。  $H_m$  近傍での詳細については、依然として未解明な問題点が多くありますが、メタ磁性転移前後で現れる磁場誘起超伝導の発現機構を解明する重要な実験結果であると考えています。実験技術の進歩が、この系の理解に直結していることを示した好例となりました。

同時測定によって実験効率の向上のみならず、試料依存性、磁場のミスアラインメントの影響のない、より定量的な議論を可能にしました。さらなる同時測定の応用として、磁化と電気分極、磁化と誘電率の測定にも取り組んでおり、共同利用で成果が挙げられつつあります。本受賞に至る経緯は必然とも思える研究対象、共同研究者の巡り合わせ、さらには共同利用経験の賜物です。このような恵まれた共同研究者、物性研の優れた研究環境下にいる幸運に感謝し、より一層の研究を邁進していきます。

[1] A. Miyake, Y. Shimizu, Y. J. Sato, D. Li, A. Nakamura, Y. Homma, F. Honda, J. Flouquet, M. Tokunaga, and D. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 063706 (2019).  
 [2] A. Miyake, H. Mitamura, S. Kawachi, K. Kimura, T. Kimura, T. Kihara, M. Tachibana, and M. Tokunaga, *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 105103 (2020).  
 [3] A. Miyake, Y. Shimizu, Y. J. Sato, D. Li, A. Nakamura, Y. Homma, F. Honda, J. Flouquet, M. Tokunaga, and D. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 103702 (2021).  
 [4] S. Ran, C. Eckberg, Q.-P. Ding, Y. Furukawa, T. Metz, S. R. Saha, I.-L. Liu, M. Zic, H. Kim, J. Paglione, and N. P. Butch, *Science* **365**, 684 (2019).  
 [5] D. Aoki, A. Nakamura, F. Honda, D. X. Li, Y. Homma, Y. Shimizu, Y. J. Sato, G. Knebel, J.-P. Brison, A. Pourret, D. Braithwaite, G. Lapertot, Q. Niu, M. Valis̃ka, H. Harima, and J. Flouquet, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 043702 (2019).  
 [6] W. Knafo, M. Valis̃ka, D. Braithwaite, G. Lapertot, G. Knebel, A. Pourret, J.-P. Brison, J. Flouquet, and D. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 063705 (2019).

- [7] G. Knebel, W. Knafo, A. Pourret, Q. Niu, M. Valisˇka, D. Braithwaite, G. Lapertot, M. Nardone, A. Zitouni, S. Mishra, I. Sheikin, G. Seyfarth, J.-P. Brison, D. Aoki, and J. Flouquet, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 063707 (2019).
- [8] S. Imajo, Y. Kohama, A. Miyake, C. Dong, M. Tokunaga, J. Flouquet, K. Kindo, and D. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 083705 (2019).
- [9] S. Ran, I.-L. Liu, Y. S. Eo, D. J. Campbell, P. Neves, W. T. Fuhrman, S. R. Saha, C. Eckberg, H. Kim, J. Paglione, D. Graf, J. Singleton, and N. P. Butch, *Nat. Phys.* **15**, 1250 (2019).



2. 授賞式の様子（オンラインで紹介があり、物性研会議室で賞状が授与された。）

