

## 古川はづき

お茶の水女子大学 理学部物理学科 助教授

プロフィール：1967年生まれ。平成4年、お茶の水女子大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了。平成7年、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。平成7年、理化学研究所磁性研究室基礎科学特別研究員。平成10年、オークリッジ国立研究所（米国）研究員。平成11年お茶の水女子大学理学部助教授。同年9月 科学技術事業団 さきがけ研究員（兼任）。現在に至る  
好きなこと：大勢で遊ぶこと、おしゃべり、温泉、“お得な”買い物。

# 強磁性と超伝導の共存と自己誘起磁束格子の探索

## 要旨

磁性超伝導体に関する研究には、長い歴史がある。特に、強磁性と超伝導の共存状態については、理論的には1950年代後半からその存在が予言されていたが、実験的には現実の系でその様な状態を安定して示す物質はこれまで確認されていなかった。また、さらに、強磁性超伝導体については、理論的な予言として自己誘起磁束格子構造の実現が指摘されている。「自己誘起磁束格子構造」とは、強磁性の自発磁化が作る内部磁場  $H_{int}=4\pi M$  の大きさが、系の下部臨界磁場  $H_{c1}$  より大きく、かつ上部臨界磁場  $H_{c2}$  より小さい場合、外部磁場を掛けなくても、強磁性成分が作る内部磁場により系が自発的に磁束格子構造をとる現象を指す。強磁性秩序がスピン1重項超伝導と共存するには、超伝導と強磁性の秩序パラメータが空間的に変調しなければならないが、その解の一つが、ゼロ磁場下での自己誘起磁束格子構造である。

我々は、近年発見された新しい金属間化合物超伝導体の1つである  $ErNi_2B_2C$  において弱強磁性と超伝導が微視的に共存することを中性子回折実験により確認することに世界で初めて成功した。 $ErNi_2B_2C$  系で観測された弱強磁性成分の自発磁化は約  $0.35 \mu_B/Er$  であり、この自発磁化が作る内部磁場  $H_{int}=4\pi M$  の大きさは約  $500 \text{ Oe}$  と、この系の超伝導の下部臨界磁場  $H_{c1}(=450 \text{ Oe})$  と同程度と見積られる。これらの結果は、 $ErNi_2B_2C$  系で、強磁性超伝導に予言されている自己誘起磁束格子構造が実験的に初めて観測される可能性を示唆している。この3年間で、得られた主な研究成果は以下のようにまとめられる。

### (1) 強磁性超伝導体 $ErNi_2B_2C$ における強磁性と超伝導の共存状態の研究

強磁性と超伝導の微視的な共存状態の研究には、 $ErNi_2B_2C$  に現われる磁気秩序の詳細な研究が不可欠である。そこで、本研究では、スピンの空間相関を直接観測することができる中性子回折実験を行い、この系に現われる磁気秩序の決定を行なった。弱強磁性成分は強磁性面を形成し  $35 \text{ \AA}$  の間隔で発生することが明らかになった。(図1参照)

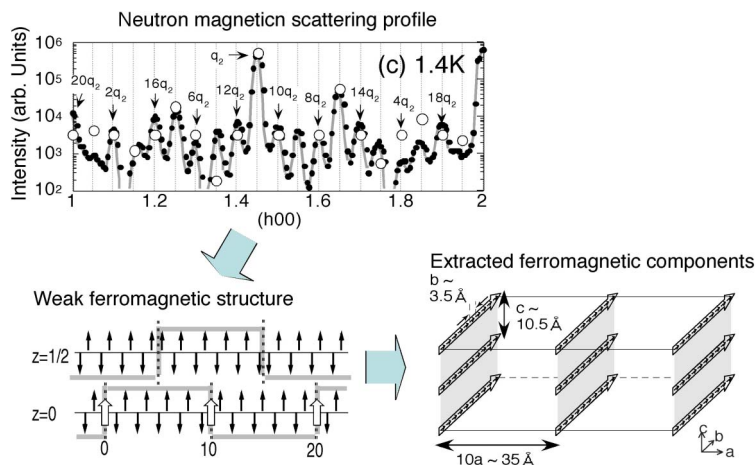


図1：  $ErNi_2B_2C$  系の中性子散乱データと決定された磁気構造 ( $T=1.4K$ )

(2) 強磁性超伝導体ErNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>Cにおける自己誘起磁束格子構造の探索

我々の磁化測定の結果は、ゼロ磁場下で系を冷却すると、強磁性のドメインがランダムな方向を向くために内部磁場がゼロとなり磁束格子が出現しないが、系を磁化容易軸方向に印加された磁場中で冷却し、強磁性のドメインを揃えると、その後、磁場を切っても内部磁場が有限となって残り、自己誘起磁束格子が出現する事を強く示唆した。(図2参照)

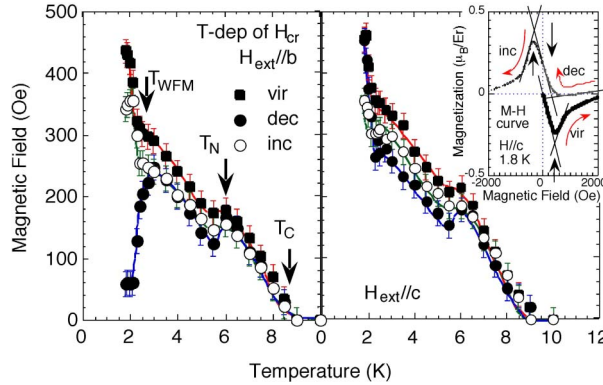


図2 : 下部臨界磁場 $H_{c1}$ の温度変化。  
弱強磁性転移温度 $T_{WFM}$ 以下で $H_{c1}^{dec}$  ( $H // b$ : 磁化容易軸)が減少し、この条件下での自己誘起磁束格子構造実現の可能性を示唆している。

そこで、磁化測定に引き続き、磁束格子の空間相関を直接観測する中性子小角散乱実験を行なった。その結果、この系で自己誘起磁束格子構造が実現していることを強く示唆する結果を得た。(図3参照)

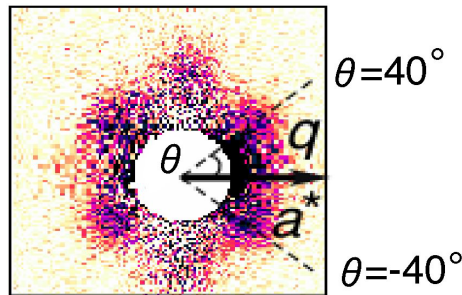


図3 : 中性子小角散乱データ。(H<sub>ext</sub>=0, T=1.6K)  
 $\theta = \pm 40^\circ$  付近に磁束格子の存在を示す散乱が観測されている。  
測定がゼロ磁場下で行なわれているため、弱強磁性の内部磁場により形成された自己誘起磁束格子構造の存在を示す。

ErNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>Cにおける自己誘起磁束格子構造の観測成功は、これまでの20年以上にわたる自己誘起磁束格子に関する研究、また、さらには40年以上にわたり継続的に行なわれてきた強磁性超伝導研究に大きな変革をもたらす非常に重要な第一歩を与えた。また、同時に、この系のさらなる研究が磁性超伝導体の研究分野に重要な成果と急激な進展をもたらす可能性を示唆している。

研究成果

1. Weak Ferromagnetic ordering in the superconducting state of ErNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C,  
H. Kawano, H. Takeya, H. Yoshizawa and K. Kadowaki  
J. Phys. Chem. Solids 60, 1053-1057 (1999)
2. Weak Ferromagnetism in superconducting ErNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C  
H. Kawano-Furukawa,  
In Rare Earth Transition Metal Borocarbides (Nitrides) : Superconducting, Magnetic and Normal State Properties, Vol 14 of NATO Advanced Study Institute, Series II, Edited by K. H. Muller and V. Narozhnyi (Kluwer Academic, pp. 223. 2001)

3. New anomaly of  $H_{c1}$  in  $\text{ErNi}_2^{11}\text{B}_2\text{C}$   
H. Kawano-Furukawa, H. Yoshizawa, H. Takeya and K. Kadowaki  
*J. Magn. Magn. Mater.*, 226-230 (2001) 278-279
4. Magnetization isotherms on  $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$ ,  $\text{Er}_{0.8}\text{Tb}_{0.2}\text{Ni}_2\text{B}_2\text{C}$  and  $\text{Er}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{Ni}_2\text{B}_2\text{C}$  single crystals,  
H. Takeya, E. Habuta, H. Kawano-Furukawa, T. Ooba and K. Hirata,  
*J. Magn. Magn. Mater.*, 226-230 (2001) 269-270
5. Coexistence of Superconductivity and (Anti-) Ferromagnetism in  $\text{RuSr}_2\text{Ycu}_2\text{O}_8$ ,  
H. Takagiwa, J. Akimitu, H. Kawano-Furukawa and H. Yoshizawa,  
*J. Phys. Soc. Jpn.* 70, 333-336 (2001).
6. Weak Ferromagnetic Order in the Superconducting  $\text{ErNi}_2^{11}\text{B}_2\text{C}$ ,  
H. Kawano-Furukawa, H. Takeshita, M. Ochiai T. Nagata, H. Yoshizawa, N. Furukawa,  
H. Takeya and K. Kadowaki,  
*Phys. Rev. B* 65, 180508 (2002)
7. Spontaneous vortex phase in  $\text{ErNi}_2^{11}\text{B}_2\text{C}$ ,  
H. Kawano-Furukawa, E. Habuta, T. Nagata, M. Nagao, H. Yoshizawa, N. Furukawa,  
H. Takeya and K. Kadowaki,  
submitted to *Phys. Rev. Lett.*
8. Confirmation of an existence of a new phonon peak in the superconducting state of  $\text{RENi}_2\text{B}_2\text{C}$   
(RE=Er),  
H. Kawano-Furukawa, H. Yoshizawa, H. Takeya, K. Kadowaki,  
submitted to *Phys. Rev. B*.
9. Study of H-T Phase Diagram of  $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$ ,  
H. Takeshita, M. Ochiai, E. Habuta, T. Nagata, H. Kawano-Furukawa,  
N. Furukawa, H. Takeya, H. Yoshizawa and K. Kadowaki,  
*Proceedings of The 23rd International Conference on Low Temperature Physics, 2002, Hiroshima*  
Submitted to *Physica C*.