

ローレンツ力による超伝導磁束格子の帯電効果：  
フレミングの左手則は超伝導電流に通用するか？

超伝導は、電流が電気抵抗なく流れる現象である。その永久電流は、アンペールの法則により磁場の源となり、磁場をまといながら定常的に流れることがわかっている。一方で、「超伝導電流にローレンツ力は働くのか。働くとしたら、どのような効果を引き起こすのか。」といった基本的問題が、未解明のまま残されてきた。これらの疑問に関連した数多くの問題の一端に、理論面で答えたのが本論文で、永久電流が磁場だけでなく電場も誘起することを示す典型例を提供している。

磁場中を運動する荷電粒子に働くローレンツ力は、フレミングの左手則に従う成分、すなわち運動方向と磁場方向の両方に垂直な成分を持っている。この「磁気ローレンツ力」は、アインシュタインの特殊相対性理論に現れる「ローレンツ変換」を用いて、電場に比例する項から導くことができ、その存在には疑問の余地がない。例えば外部電場のかかった金属では、この横成分により電子の軌道が曲げられて表面に電荷が蓄積し、最終的に磁気ローレンツ力を相殺する横電場が発生して定常状態を回復する。この「ホール効果」に関しては、金属や半導体を舞台に、非常に活発な研究が実験・理論両面で行われてきた。二次元半導体の強磁場中での量子ホール効果が特に有名である。

対照的に、超伝導電流に働くローレンツ力に関しては、これまでほとんど研究されてこなかった。ローレンツ力の効果は、アンペールの法則に従う巨大な反磁性効果の背後に隠れ、見落とされてきたのである。実際、不均一な超伝導状態を記述する標準的枠組みである「ギンツブルグ-ランダウ方程式」や「準古典方程式」には、ローレンツ力が欠落している。これらの方程式は、ゴルコフ方程式から変数消去により微視的に導出できることが知られている。しかしローレンツ力は、導出過程で方程式のゲージ不変性を適切に取り扱い、「準古典パラメータ」に関する展開を一つ高次まで行って初めて顔を出すのである。<sup>1,2)</sup>

北海道大学大学院の理論グループは、そのようにして得られた「拡張準古典方程式」を用いて、第二種超伝導体の熱平衡磁束格子状態における帯電効果を理論的に調べた。超伝導体では、秩序変数である「巨視的波動関数」の一価性に由来して、磁束(=磁場の束)の量子化が起こる。特に、「第二種超伝導体」と呼ばれるある種の超伝導体では、下部臨界磁場  $H_{c1}$  と上部臨界磁場  $H_{c2}$  との間で、量子化された磁束が「アブリコソフ格子」と呼ばれる周期構造を形成することが知られている。例えると、鳴門海峡に渦が沢山できて格子状に並んでいる状態である。各磁束芯の周りには、超伝導電流が渦を巻いて流れているので、ローレンツ力により電流と垂直方向に電荷の偏りが生じ、磁束芯を一端とするホール起電力が発生すると予想される。計算の結果、予想通り、磁束格子には周期的な電場も重なって発現するということがわかった。さらに、この電場は大きな磁場依存性を持ち、上部臨界磁場の半分程度の磁場でピーク値を持つことを明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2016 年 8 月号に掲載された。

図 1 は、低温 ( $T/T_c=0.2$ ) かつ中間磁場 ( $H/H_{c2}=0.5$ ) における磁束芯周りの電荷密度の空間分布である。渦中心で鋭いピークを持ち、その周りで複雑な形状を示している。この構造は、周りの磁束芯からの影響である。さらに、この電場は特徴的な磁場依存性を持ち、 $H_{c2}$  の半分程度の磁場でピークを持つことが明らかになった。図 2 の赤線 ( $T/T_c=0.2$ ) と緑線 ( $T/T_c=0.5$ ) は、渦中心における電荷密度の磁場依存性である。電荷は、 $H_{c2}$  の半分程度までは増加し、その後減少するというピーク構

造を持つ。この振る舞いは、「単調減少する超伝導エネルギーギャップ」と「単調増加する外部磁場」の競合で出現することが、ギンツブルグ-ランダウ方程式を用いた解析から明らかになった。このピーク構造はローレンツ力による帯電効果の特徴であり、実験的に他の機構との識別が可能である。

今回の平衡状態の解析で、超伝導ホール効果による磁束格子帯電効果の特徴的な磁場依存性が明らかになった。同様の帯電効果は、「孤立渦」の渦芯近傍や、磁場を排斥する「マイスナー状態」の表面付近でも出現することが予言されている。<sup>3,4)</sup>この他にも、超伝導ホール効果に関する研究課題は、特に磁束の運動を伴う非平衡状態で山積している。今後、拡張準古典理論の解析手法が確立すれば、上記の問題を含め、種々の超伝導体における電流輸送特性を、あらゆる温度・磁場・不純物濃度で解明できると期待される。

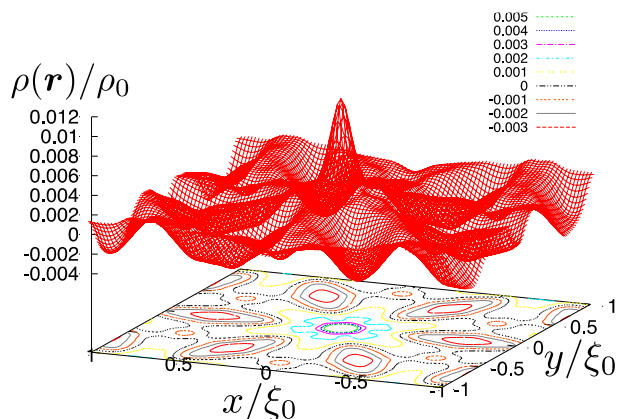


図 1.  $T/T_c = 0.2$ ,  $H/H_{c2} = 0.51$  の電荷密度分布

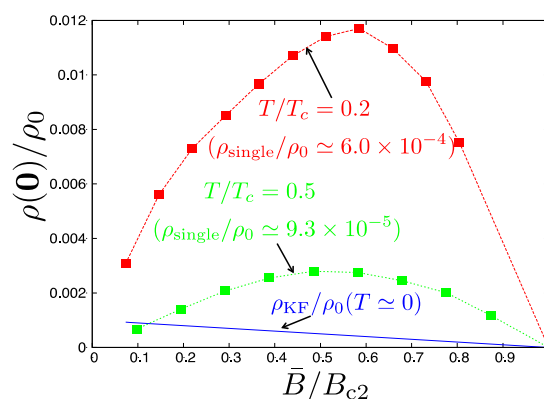


図. 2 : 渦中心点の電荷密度の磁場依存性

#### 参考文献

- 1) T. Kita, Phys. Rev. B **64**, 054503 (2001).
- 2) H. Ueki, W. Kohno and T. Kita, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 064702 (2016).
- 3) T. Kita, Phys. Rev. B **79**, 024521 (2009).

#### 原論文

Hall Effect in the Abrikosov Lattice of Type-II Superconductors  
W. Kohno, H. Ueki and T. Kita, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 083705 (2016).

問合せ先：北 孝文（北海道大学大学院理学院）