

磁気光学効果を用いた超伝導体・磁性体の実空間磁気構造観察

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 徳永将史

我々はこれまで磁気光学(MO)イメージング法を用いて高温超伝導体における複合磁束状態やマンガン酸化物における相分離現象の研究を行って来た。MO イメージング法とは、試料中の磁束密度分布を、試料表面においてインジケータ膜を介して可視化し、偏光顕微鏡を通して観測する方法である。他の磁気イメージング法と比較して、(1)試料全体にわたる情報をリアルタイムで測定可能である、(2)試料表面の光学特性等に依らず純粋に磁束密度分布を観測できる、という特徴を持つ。

第 II 種超伝導体に印加された磁場は量子化磁束として超伝導体中に侵入する。磁束間には斥力相互作用が働くため、侵入した磁束は通常、三角格子を組み周期的に配列する。この磁束の規則配置は温度・磁場の上昇で破られる(磁束格子融解転移)。このような磁束量子を構成要素とした相転移に関する問題は、原子を構成要素とした condensed matter に対し、vortex matter の物理として盛んに研究が進められて来た。コヒーレンス長が短く揺らぎの効果が強い高温超伝導体では広い温度・磁場範囲で磁束液体相が存在するため、vortex matter の研究に格好の舞台となって来た。

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ のように有効質量に非常に大きな異方性を持つ高温超伝導体では、外部磁場を超伝導層に垂直にかけた場合と平行にかけた場合とで、異なる種類の磁束量子(パンケーキ磁束とジョセフソン磁束)が形成される。このような系に超伝導層から適当な角度だけ傾けて磁場を印加すると両磁束の共存状態が実現する。この共存状態において、パンケーキ磁束とジョセフソン磁束との間に引力相互作用が働く事が最近明らかになった[1]。この引力相互作用を反映して、二種類の磁束量子で構成される磁束固体相は様々な結晶構造を実現(図1左)し、複合磁束系(composite vortex matter)における相転移という学術的研究分野を展開している。また引力相互作用の存在はジョセフソン磁束によるパンケーキ磁束のマニピュレーションを可能にしたため[2]、磁束量子をビットとした論理回路形成を視野に入れた応用面でも注目されている[3]。

我々は MO イメージング法によって傾斜磁場下で形成される磁束鎖を直接観察し、磁束鎖の外部磁場に対する

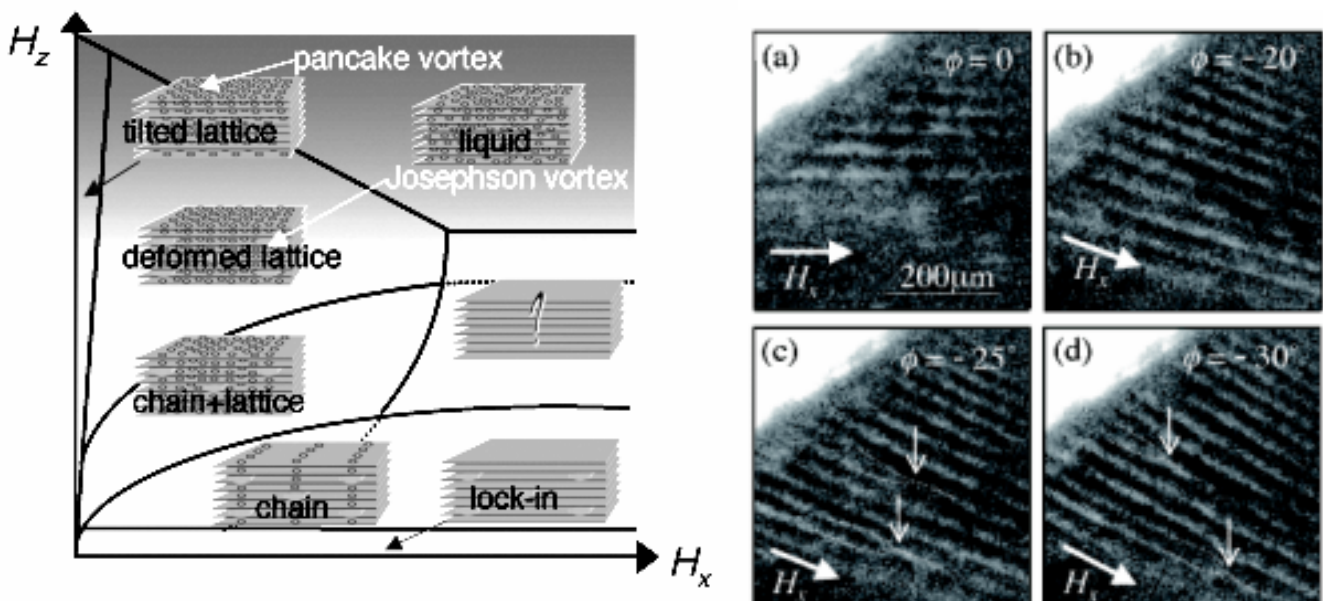


図1 (左)高温超伝導体の複合磁束相図の模式図。(右)MO法で観測した $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ の磁束鎖[4]。

応答を研究している(図1右)。これまでの研究では磁束鎖が外部磁場の振幅および方向に応じて起こす変化を可視化しており、磁束マニピュレーションの相互作用の見積もり、また磁束鎖の安定性等に関する知見を得ている。

近年強相関電子系の研究において二つの競合する秩序相の境界、多重臨界点近傍の物理が注目を集めている。強相関電子系の主な舞台となっている遷移金属酸化物の多くは混晶系であり、本質的に避けられないランダムネスの効果によって、相分離状態が実現される可能性がある。マンガン酸化物の場合、強磁性金属相と反強磁性(または常磁性)絶縁体相とへの相分離が起こり、その事が巨大磁気抵抗効果を起こしているとの見方もある。

我々は MO イメージングによって相分離状態にあるマンガン酸化物の不均一磁化分布を観察した。さらに相分離状態における不均一な電流分布をイメージングする事に初めて成功した(図2左)[5]。試料に流す電流を増加させると電流分布は不均一から均一へと変化する(図2中)。この変化は非常に急峻であり、電圧-電流特性にも電圧の跳びとして現れる。この特異な電圧-電流特性の磁場依存性を利用する事で、弱磁場での巨大磁気抵抗効果を実現できる。図2右に示したように適当な電流下では 1 kOe 以下の磁場で抵抗率が 1/1000 に低下しており、通常の弱電流下における磁気抵抗効果(図中破線)と比較して 30 倍以上の磁場感度を実現している。

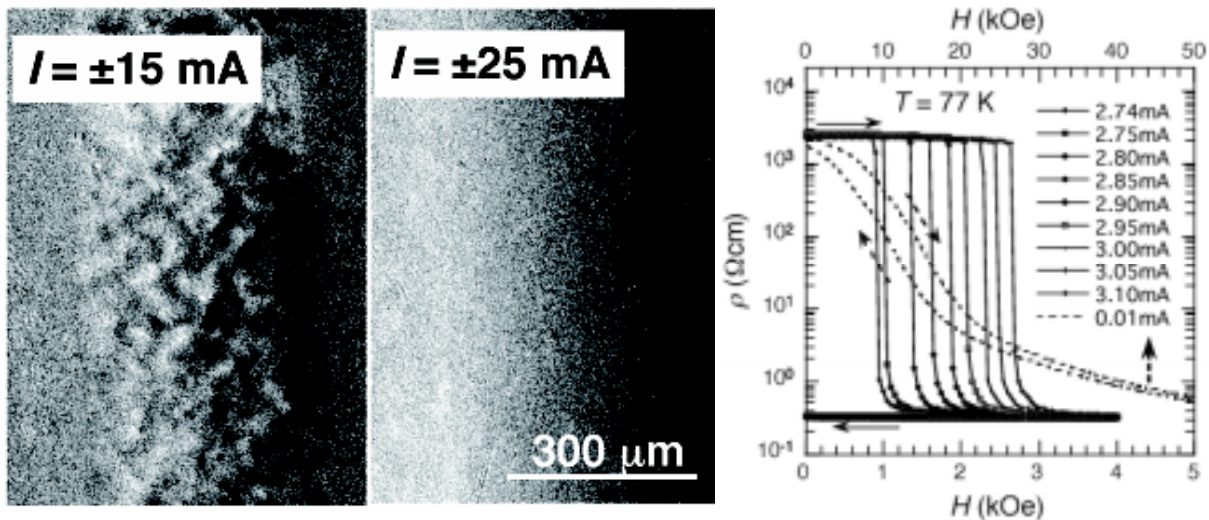


図2 (左、中)MO イメージング法で観測した $\text{La}_{0.21}\text{Pr}_{0.49}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 結晶中を流れる電流の作る磁場分布[5]。電流の増加によって電流分布は不均一から均一へと変化する。(右)同結晶における磁気抵抗効果。印加する電流を調整する事で弱電流時(破線)の30分の1の磁場で同等の磁気抵抗効果を実現できる。

参考文献

[1] A. E. Koshelev, Phys. Rev. Lett. **83**, 187 (1999).
 [2] A. N. Grigorenko *et al.*, Nature **414**, 728 (2001)
 [3] S. Savel'ev and F. Nori, Nature Material **1**, 179 (2002).
 [4] M. Tokunaga *et al.*, Phys. Rev. B **66**, 060507(R) (2002).
 [5] M. Tokunaga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 037203 (2004).