論文内容の要旨

論文題目：メゾスコピック超伝導体における渦糸状態
(Vortex States in Mesoscopic Superconductors)

氏名　佐野　浩孝

本論文は，メゾスコピック超伝導体において実現する新奇な渦糸状態について調べた研究について報告するものである．

第 2 種超伝導体に磁場をかけると，その内部に渦糸が生成される．渦糸同士の間には Lorentz 力に起因する反発力が働くので，超伝導体が十分大きい場合，渦糸は Abrikosov 格子と呼ばれる三角格子を組む．しかし超伝導体が渦糸の大きさと同程度の大きさの構造を持つ場合には，試料端からも反発力を受けるため，試料形状を反映した特有の渦糸状態が実現すると言われている．そのような超伝導体を一般にメゾスコピック超伝導体と呼ぶ.「メゾスコピック」とは,「ミクロ」と「マクロ」の中間的な大きさ，つまり系の物理的性質を特徴付ける長さスケールと同程度の大きさ，という意味である．超伝導体の場合で言えば，渦糸の大きさ，より具体的にはコヒーレンス長 ξ や磁場侵入長 λ がその長さスケールに相当する．本研究の目的は，そのようなメゾスコピック超伝導体において実現する新奇渦糸状態ついて実験的に調べることである．本研究では特に，メゾスコピック超伝導体として「幅 ξ 程度の細線からなる超伝導ネットワーク」と「大きさ ξ 程度の微小超伝導体」の 2 つの構造に着目し，そこでの渦糸状態について調べた.

超伝導ネットワークの相転移は，オーダーパラメータの振幅がゼロから有限になる平均場的相転移とオーダーパラメータの位相が揃う相転移に分けて考えることができる．本研究では特に渦糸充填率 $\alpha = 1/2$ における位相の相転移について調べた．$\alpha = 1/2$ の超伝導ネットワークは理論的には Fully Frustrated XY（FFXY）モデルで記述され [1]，その最大の特徴は基底状態での渦糸配置が 2 重に縮退している点にある．FFXY モデルにおいては，図 1(A) の (i) ような XY モデル本来の渦対の励起に加えて 2 重縮退に起因する図 1(A) の (ii) のような反位相ドメインの励起が存在し，この 2 種類の励起の競合が FFXY モデルの相転移を複雑なものにしている．理論的には，まずドメイン境界に図 1(A) の (iii) のようなキンクが発生し，それが周囲の位相秩序を乱すことで渦対の励起に関する BKT 転移を引き起こす，というキンク誘起 BKT 転移と呼ぶべき描像によって理解されている [2]．しかし，

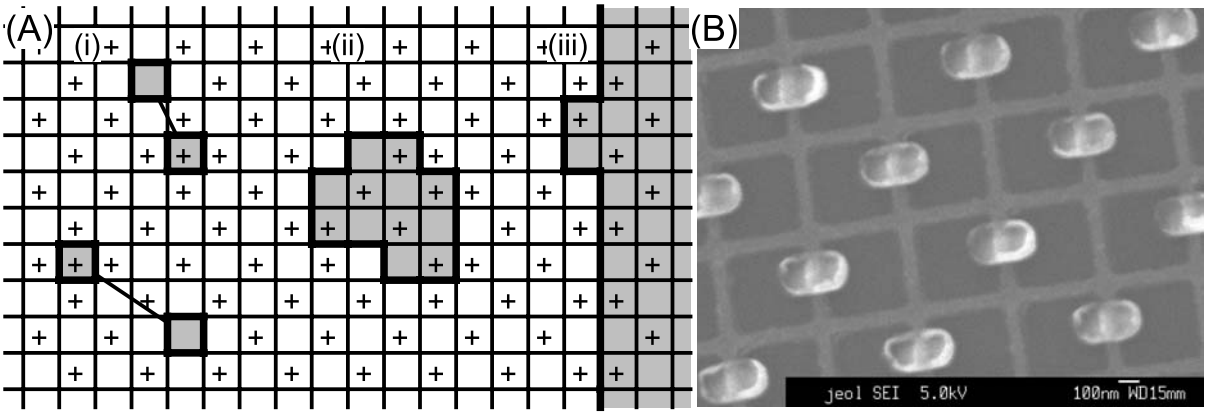

図 1: (A)FFXY モデルにおける励起．(i) 渦対，(ii) 反位相ドメイン，(iii) キンク対．(B) 超伝導ネットワークの試料の電子線顕微鏡写真．白い格子が Al の超伝導ネットワーク．明るく見えているのが Co の強磁性体ドット．

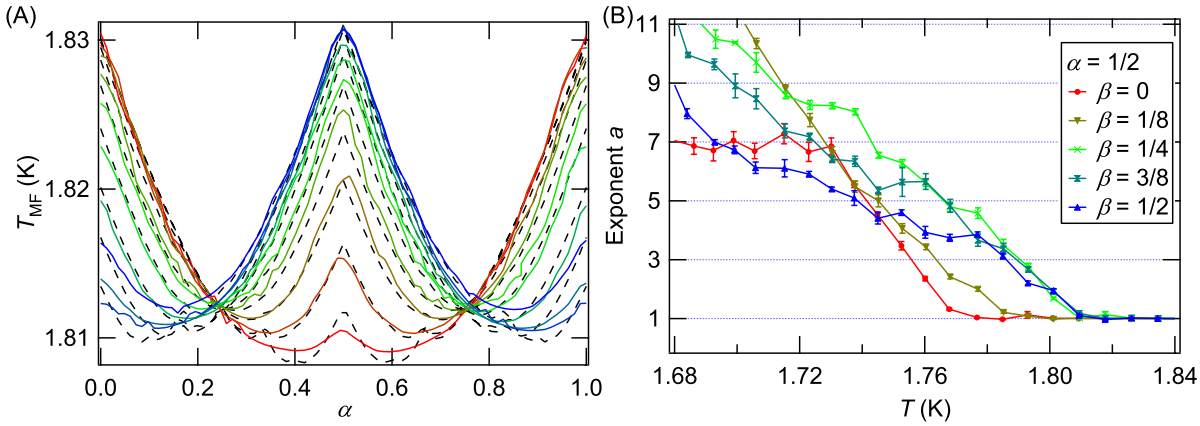

図 2: (A) 空間変調磁場の導入に伴う LPO の変化．実線が実験結果で，点線はそれに対する理論計算のフィッティング．(B) 空間変調磁場を変化させたときの $\alpha = 1/2$ での電流電圧特性のべき指数の温度依存性の変化．べき指数の算出の際の誤差も併せて示してある．

その実験的な検証は全くおこなわれていない．

図 1(B) のように超伝導ネットワーク上に微小な強磁性体ドットを配置すると，そこからの漏れ磁場により超伝導ネットワークにチェッカーボード型の空間変調磁場が導入され，渦糸配置の 2 重縮退を解くことができる．本研究では，空間変調磁場の導入に伴う $\alpha = 1/2$ での相転移の変化について調べることで，FFXY モデルの相転移において反位相ドメインの果たす役割を明らかにすることを目指した．ただ，そもそも空間変調磁場下の超伝導ネットワークについての実験自体これまでほとんどおこなわれていない．そこで，位相の相転移についての実験に先立って，まず空間変調磁場による平均場的相転移の変化を調べた．超伝導ネットワークの平均場的相転移温度 T_{MF} は磁場に対して Little-Parks 振動 (LPO) と呼ばれる周期的な振動を示す [3]．図 2(A) の実線は，この LPO の空間変調磁場による変化を示したものである．理論計算から得られた結果（点線）と非常に良く一致している．

続いて，位相の相転移について調べるため，電流電圧特性の測定をおこなった．図 2(B) は，電流電圧特性のべき指数の温度依存性の空間変調磁場による変化を示したものである．ただし，図中の β は強磁性体による渦糸充填率の空間変調成分である．観測された変化のうち，転移温度の変化につい

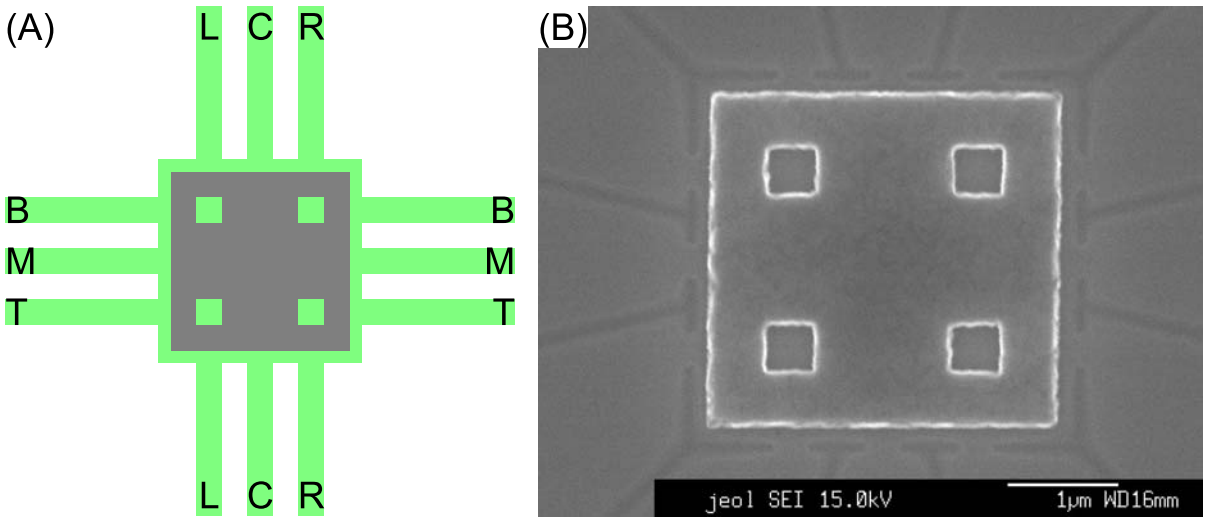

図 3: 微小超伝導体試料．(A) 試料の模式図．縦横 3 組ずつの端子を備えた多端子 Hall cross 上に微小超伝導体を作製した．端子対 L,C,R を電流端子として，端子対 T,M,B を電圧端子としてそれぞれ用いた．(B) 試料の電子線顕微鏡写真．超伝導体の材質は Al．基板は GaAs/AlGaAs 2DEG 基板で，細い溝はウェットエッチングにより削った部分．

ては空間変調磁場によってドメインの励起が抑制されることによる変化と考えることで理解できた．一方，転移温度より低温でのべき指数はキンク誘起 BKT 転移の描像から期待される振る舞いから外れていた．この差異に関しては，渦糸がドメインに引き寄せられること，及びそのためにドメイン周囲で位相の相関が他の領域よりも弱くなることを仮定すれば，キンク誘起 BKT 転移の描像で説明できることがわかった．

一方，微小超伝導体については，渦糸配置の実験的な観測を目的とした研究が近年盛んにおこなわれている．微小超伝導体中に侵入した渦糸は試料の形状の持つ対称性に合わせた配置をとるが，特に正方形のように離散的な回転対称性を持つ形状の試料においては，その回転対称性と渦糸の本数との折り合いがつかない状況が生じる．このような場合には，自発的に渦糸と反渦糸の対を生成して対称性に合わせた渦糸配置をとると言われている [4]．しかし，現在に至るまでこの反渦糸を実験的に観測した例はない．

そこで本研究では，微小正方形試料における反渦糸の実験的観測を目指した．反渦糸の観測のためには局所的な磁場を測定する必要があるが，本研究ではその手法として Hall magnetometry を用いた [5]．Hall magnetometry は，主に半導体の 2 次元電子ガス (2DEG) 基板から作製した微小 Hall 素子上に試料を作製し，試料直下での局所磁場の変化を Hall 抵抗の変化として測定するものである．本研究では，図 3(A) に示したように Hall 素子の端子を細かく分割した多端子 Hall cross を用いることで Hall 素子内部での磁場の空間変化を調べた．また，試料としては図 3 に示したように正方形の 4 隅に微細孔をあけたものを用いた．このように 4 隅に微細孔をあけることで，反渦糸を安定化すると共に反渦糸と周囲の渦糸との距離も大きくなると期待される [6]．

図 4 は，渦糸からの磁場の空間分布が渦糸状態の変化に伴って変わっていく様子を示したもので，緑色の濃い領域ほど磁場が強いことを表している．また，矢印に添えてあるグラフはその前後の状態間での磁場の変化量の分布であり，青は外部磁場の増加とともに渦糸からの磁場が増加したことを，赤は減少したことを，それぞれ表している．この磁場の変化量の分布をもとに，青が濃い領域に新たに渦糸が入り，赤が濃い領域からは渦糸が出ていったと考えると，渦糸のない Meissner 状態から順に渦糸の配置を決定していくことができる．図中の黒丸はそのようにして決定した各状態での渦糸の

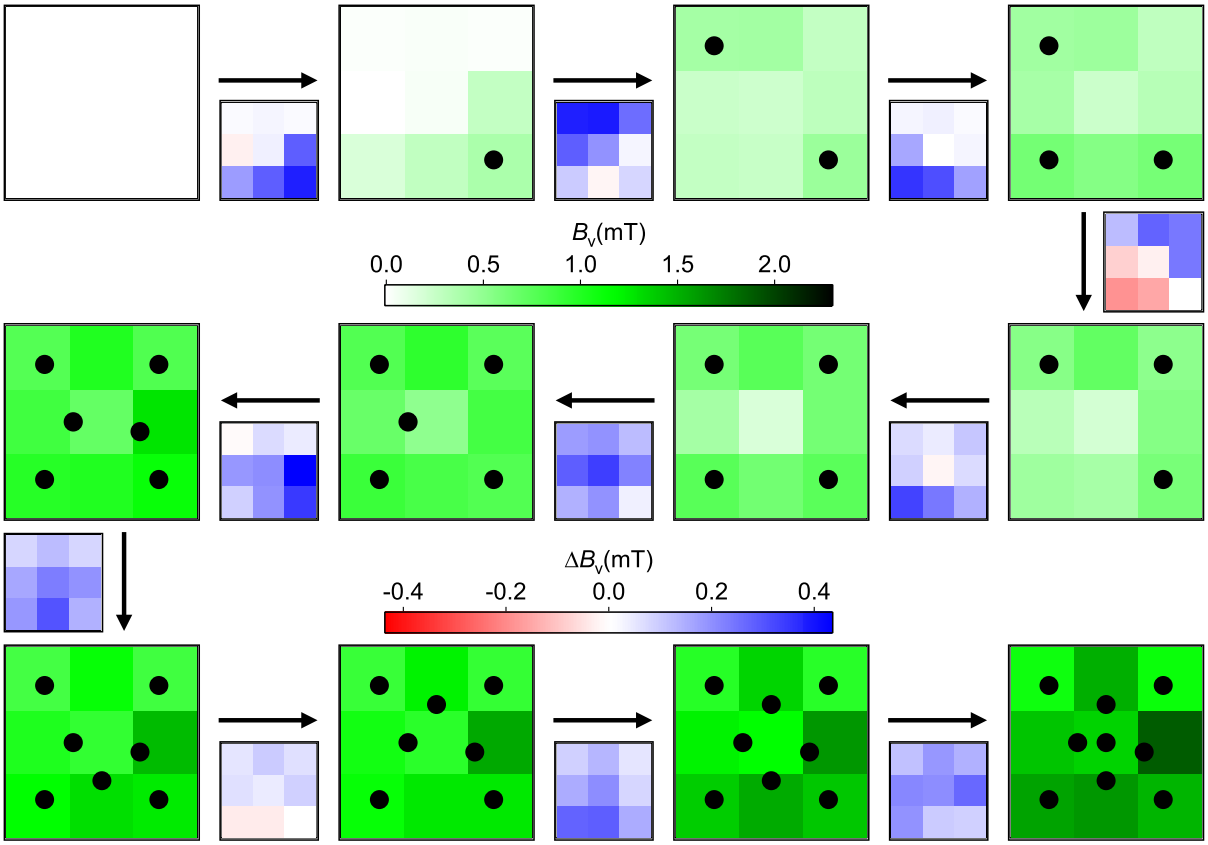

図 4: 微小超伝導体内での渦糸状態の変化に伴う磁場の空間分布の変化．緑色の濃さが各領域での磁場の強さを表している．各状態での渦糸の配置を黒丸で示す．矢印に添えたグラフは矢印の前後での磁場の変化量の分布を表しており，青が増加，赤が減少を表す．

配置である．まず 4 隅の微細孔に渦糸が入り，その後，中央付近に渦糸が入っていく様子がわかる．また，試料に入っている渦糸が 3 本のときと 7 本のときに渦糸が並び替わる様子も観測された．ただし，理論計算によって予言されている反渦糸の生成は観測されなかった．これは，微細孔による渦糸のピン留めが強すぎて試料形状の対称性が渦糸配置に反映されなかったためと考えられる．

参考文献

[1] S. Teitel and C. Jayaprakash, *Phys. Rev. B*, **27**, 598 (1983).

[2] S. E. Korshunov, *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 167007 (2002).

[3] B. Pannetier, J. Chaussy, R. Rammal, and J. C. Villegier, *Phys. Rev. Lett.*, **53**, 1845 (1984).

[4] L. F. Chibotaru, A. Ceulemans, V. Bruyndoncx, and V. V. Moshchalkov, *Nature*, **408**, 833 (2000).

[5] A. K. Geim, S. V. Dubonos, J. G. S. Lok, I. V. Grigorieva, J. C. Maan, L. T. Hansen, and P. E. Lindelof, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2379 (1997).

[6] R. Geurts, M. V. Milošević, and F. M. Peeters, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 137002 (2006).