

幾何学的な構造を持つ微小超伝導体に閉じ込めた磁束状態

電気通信大学 小久保伸人 (kokubo@pc.uec.ac.jp)

日本原子力研究開発機構 岡安 悟

極低温科学センター 野島 勉

1. 背景

小さな超伝導体に誘起された量子化磁束 $\Phi_0 (= h/2e \approx 2 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2)$ は、磁束を周期的に並べようとする斥力相互作用と試料形状による閉じ込めとの競合により、微小系特有な配列状態を形成する[1-4]。微小円板に現れる同心円状に並んだ磁束の殻(シェル)構造はその典型例であり、メンデレーエフの周期律に似た充填規則を伴う。メゾやナノスケールの平面構造に閉じ込めた電子(ウイグナークラスタ)[5]、コロイド[6]、ダストプラズマ[7]等が示す配列状態と密接に関連し、共通する多くの規則性が殻構造やその充填規則に見出されている [8]。

このような殻構造に関する研究のほとんどは最も対称性がよい円形状の閉じ込めを扱う。これに対し、三角形や正方形といった多角形状の閉じ込めとなると、配列と試料形状との間に幾何学的な“つり合い”が生じ、これが上記の競合に加わる。このため閉じ込め形状に応じた独特な殻構造や充填規則が期待される [9, 10]。特に、印加磁場とは反対向きの磁束(反磁束)を伴う状態は、形状とのつり合い(対称性)により誘起される超伝導磁束系に特有な物理現象として提案され、注目されている [11]。

閉じ込めた磁束状態を調べるには、磁束配列を直接観測する実験が最も有効とされる。本稿では、われわれが磁気顕微鏡を用いて行ってきた可視化実験のなかで、三角形及び正方形の微小超伝導体で直接観測した結果を中心に紹介する[12, 13]。円板やその他の形状の結果については解説を参考にしていただきたい[14]。

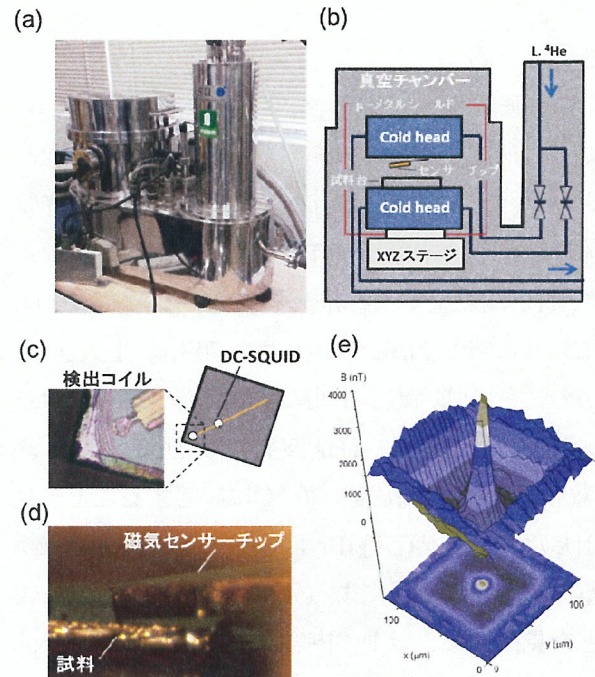


図 1 極低温科学センター低温科学部に設置された走査 SQUID 磁気顕微鏡の (a) 写真と (b) 概略図。 (c) センサーチップの模式図と検出コイル付近の写真。 (d) センサーチップ (上部) と試料 (下部) の写真。 (e) 可視化した正方形のアモルファス超伝導薄膜における磁束状態。

2. 走査 SQUID 磁気顕微鏡と非晶質超伝導膜

用いた磁気顕微鏡 [セイコーインスツルメンツ(株)製 SQM-2000]を図1に示す。概略図(図1b)に示すように、内部は基本的に連続ヘリウムフロー型のクライオスタットで、対向する磁気センサー台と試料台を冷却する。試料台の下部に XYZ 方向の稼働軸をもつ稼働ステージがあり、これを使って磁気センサーチップへのアプローチ及びスキャンを行う(図1d)。センサーチップはニオブベースの dc-SQUID(超伝

導量子干渉計)素子と先端にある Nb の検出コイルから成る(図 1c)。空間分解能は検出コイルの径で決まり、標準的な検出コイル(外径 $10\ \mu\text{m}$ 、線幅 $2\ \mu\text{m}$)でおよそ $4\ \mu\text{m}$ 程度である。

試料は非晶質な超伝導体 [アモルファス $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ ($x \approx 78\%$, $T_c \sim 6\text{--}7\ \text{K}$)] を用いた。ピン止めの影響が少ないため本質的な磁束状態が期待できる。微小試料の磁束状態は、試料端の表面バリアの影響により、磁場の履歴に依存しやすい。このため磁束の平衡状態が現れる磁場中冷却(Field Cool)を行い、磁束配列を可視化した。図1e は正方形の試料($76 \times 76\ \mu\text{m}^2$)で得られた磁気イメージである。下図に示すように磁場の強弱から磁束が正方形試料のどの位置に現れるのかわかる。

3. 正方形の微小超伝導体における磁束配列

それではまず、正方形の試料($76 \times 76\ \mu\text{m}^2$)で得られた結果について述べる。図2に誘起された磁束数 L と印加磁場 H の関係を示す。印加磁場に対して1つずつ階段状に増加するメソスコピックな性質が現れることがわかる。印加磁場が全て試料に侵入した状態を実線(残留磁場を考慮して原点をずらした)で示すと、侵入した磁束が少ないことに気が付く。これは試料の磁化(反磁性)を表わし、磁束数の変化は磁化の飛びに対応する。磁束数の増加に対する配列変化は、図3に示す磁気イメージで順に追うことができる。磁束配列はペア(図 3a)、三角形(図 3b)、四角形(図 3c)と成長し、その後、その四角形の中心に新たな磁束が入る二重の殻構造を形成する(図 3d)。内外の殻を構成する磁束の占有数を使って $(1, 4)$ と表わすとわかりやすい。磁束数をさらに増加させると、殻構造は次のように成長する。まず外側の殻を構成する磁束の占有数が $4 \Rightarrow 8$ まで増加する。すなわち、 $(1, 4) \Rightarrow (1, 5) \Rightarrow (1, 6) \Rightarrow (1, 7) \Rightarrow (1, 8)$ と変化する。その後、内側の殻の占有数が $1 \Rightarrow 4$ まで増加して $(4, 8)$ となるが、再び外側の殻が $8 \Rightarrow 12$ まで増え $(4, 12)$ となる。すなわち、内外の殻が 4 の整数倍になるように交互に成長する。 $4, 8, 12$ という 4 の

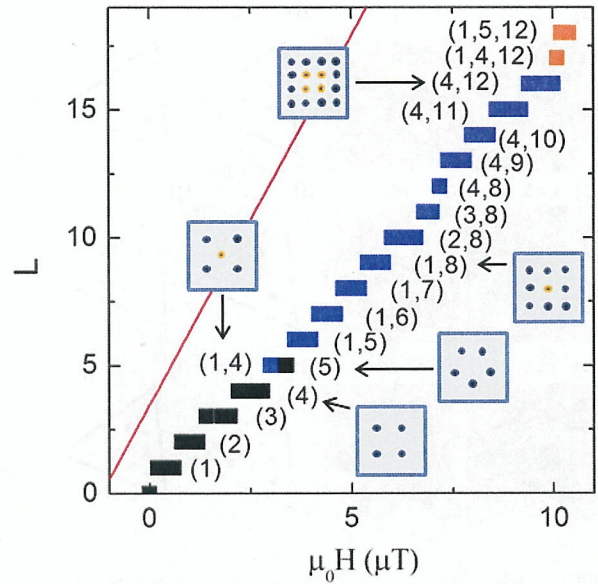


図2. 正方形($76 \times 76\ \mu\text{m}^2$)のアモルファス超伝導薄膜で得られた磁束数 L と印加磁場 H の関係。

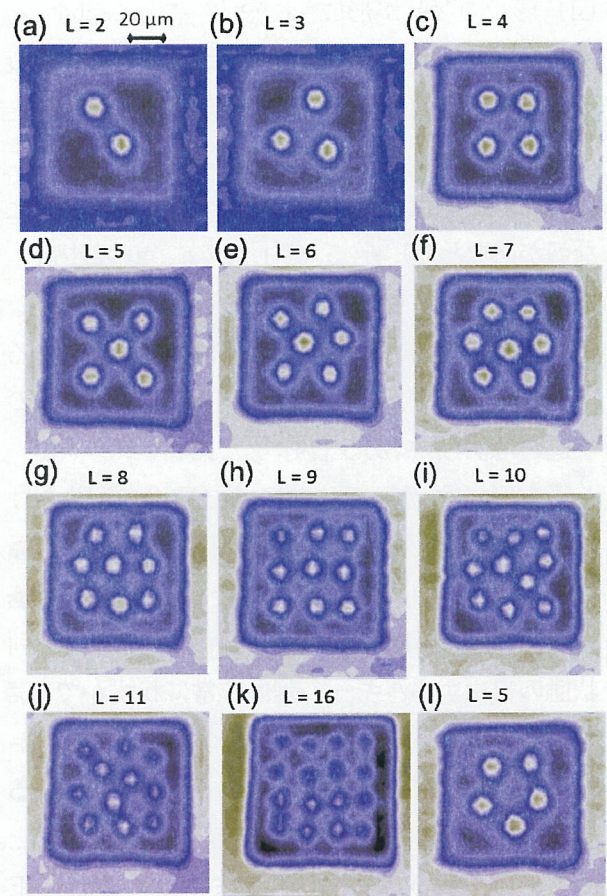


図3. 正方形($76 \times 76\ \mu\text{m}^2$)のアモルファス超伝導薄膜で得られた磁束配列の磁気イメージ。

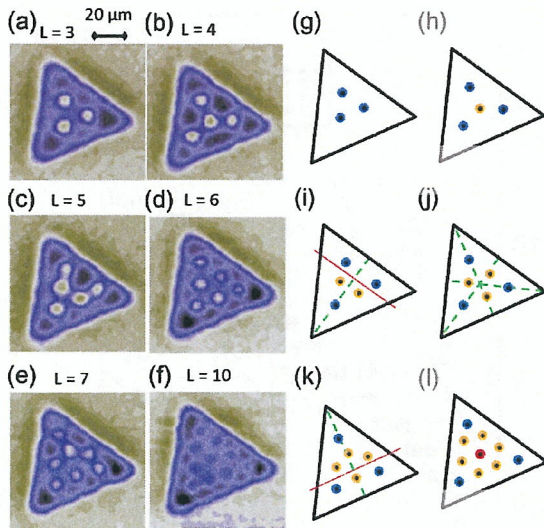


図4. 正三角形形状（一辺 $75 \mu\text{m}$ ）のアモルファス超伝導薄膜で得られた磁束配列の磁気イメージ[(a) - (f)]と配列のトレース図[(g) - (l)]。

整数倍の占有数をもつ磁束配列が多いが、これは四角形状の“殻”が形成されやすいことに起因する。閉殻状態を示す磁束の占有数は最初(内側)の殻が4、次の殻が12とされる。したがって $L=4$ の(4)と $L=16$ の(4, 12)が閉殻な配列となる。これらの殻にはこれ以上磁束を入れることができないので、新たな殻が必要となり、 $L=5$ で(1, 4)の二重の殻構造、 $L=17$ で(1, 4, 12)の三重の殻構造が形成される。円板で得られた結果($L=6$ 及び 17)と近い値であるが、磁束配列はそれぞれ(1, 5)と(1, 5, 11)となるので違いは明らかである [14]。

正方形では、 $L=5$ において、(1, 4)の配列だけでなく五角形配列 (図 3l)も観測される [12]。計算機シミュレーションの結果によると、(1, 4)配列が基底状態(他方が準安定状態)とされるが、2つの配列状態の自由エネルギーの差は非常にわずかで、実験的にどちらが現れてもおかしくはない [15]。 $L=17$ でも同様に(1, 4, 12)と(5, 12)が観測されている [16]。したがって、これらの準安定状態を考慮すると、充填規則は実験的に明確に定まらない。これが正方形に閉じ込めた殻構造の特徴の一つとされる。

その他の磁束数でも複数の配列状態が現れる可能性がある。特に注目されてきたのが反磁束を伴う状態で、正方形の対称性から四角配列の中央に反

磁束を伴う (-1,4)が $L=3$ で現れると提案されている [11]。しかし、われわれの知る限り、反磁束状態の存在を示す直接的な実験証拠はこれまで得られていない。今後の課題である。

4. 正三角形形状の微小超伝導体における磁束配列

次に正三角形形状(一辺 $75 \mu\text{m}$)の試料で得られた結果について述べる。磁束間にはたらく斥力相互作用は三角格子への秩序化をもたらすので、これが閉じ込め形状とつり合えば、図 4a, 4c, 4f に示すように、三角格子の一部がそのまま現れる。いずれも、トレース図 4j に示すように、正三角形の対称軸(破線)に対して鏡面な対称性を伴うつり合い配列である。これらは磁束数が三角数を満たす場合であるが、 $L=4$ でも、図 4b と 4h に示すように、同様の対称性で特徴づけられる配列が現れる。一方、上記以外の磁束数では形状と幾何学的につり合わないため、独特な配列が現れやすい。例えば、 $L=5$ ではVの字のような配列となる。これは $L=6$ の三角配列から磁束が一つ欠けたものとみなすとわかりやすい。 $L=7$ の配列は $L=6$ の三角配列に磁束が一つ割り込んだものとなる。このような配列をトレースすると、図 4i と 4k に示すように、一本の対称軸に対する鏡面の対称性が残っていることがわかる。これは二等辺三角形が持つ対称性である。詳しい議論は省くが、実際に二等辺三角形形状の試料を用意して調べると、正三角形で得られたような磁束配列が現れる[13]。この事実は、正三角形の磁束状態は二等辺三角形に現れる磁束配列の一部を含んでいることを示唆している。正三角形の対称性を満たすような配列を組むことができないので、対称性が低い配列に落ち着いたと解釈されている。

さて、このような三角形形状を強く反映した配列を上記の殻構造の概念で整理するのは容易なことではない。例えばトレース図に色付けして示したように、頂点に近い3つの磁束が常に最外殻を形成すると仮定すると、 $L=6$ は(3, 3)の二重の殻構造、 $L=10$ は(1, 6, 3)の三重の殻構造となる。このようにまとめると、二重と三重の殻構造が現れるのはそれぞれ $L=4$ と 9 となり、円板や正方形の

結果と比べると少ない。また閉殻状態の各殻の占有数に不自然な点があり議論が続いている [14]。

三角形の磁束配列では、殻構造の代わりに、基本的な磁束配列を組み合わせで整理する分類法が提案されている [10]。例えば $L=5$ のトレース図に示すように赤線で磁束配列を分割すると、 $L=3$ の三角(つり合い)配列と2個の“磁束鎖”の組み合わせと見なすことができる。これはつり合いの三角配列を使って直観的にわかりやすく整理できる利点を持ち、さらに上記の対称性の議論ともかみ合うので便利である [10,13]。

5. まとめ

三角形及び正形状に加工したアモルファス超伝導薄膜で観測した磁束配列の磁気イメージをもとに、磁束配列の殻構造、充填規則そして幾何学的なつり合いを解説した。得られた成果はメゾスケールあるいはナノ構造に閉じ込めた磁束が示す基礎物性の解明に貢献すると期待される。今回はあまり触れなかったが、正形状の試料では磁束ペア状態に縮退があり、これを使って情報の基本単位を表現し、磁束間にはたらく斥力相互作用を巧みに活用したセルオートマトン型の磁束論理ゲートが提案されている[17]。また、微小超伝導体に設けた小さな穴や窪みを使って、磁束配列を人工的に制御し、反磁束状態を見出す提案もある[18]。今後は、デバイス応用も含めた方向への発展も必要であると思われる。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(C) (23-26年度)、基盤研究(B) (26-28年度(予定))からの援助、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(北九州産業学術推進機構、筑波大学微細加工プラットフォーム)の支援を受けて実施した。一部は東北大学金属材料研究所研究部共同利用研究(13K0029, 14K0004)として実施した。

参考文献

- [1] A. I. Buzdin and J. P. Brison, *Phys. Lett. A* **196** (1994) 267.
- [2] B. J. Baelus, L. R. E. Cabral, and F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 064506.
- [3] L. R. E. Cabral, B. J. Baelus, and F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 144523.
- [4] N. Kokubo, S. Okayasu, A. Kanda, and B. Shinozaki, *Phys. Rev. B* **82** (2010) 014501.
- [5] R. C. Ashoori, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992) 3088.
- [6] K. Mangold, J. Birk, P. Leiderer, and C. Bechinger, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **6** (2004) 1623.
- [7] W. T. Juan, Z. Huang, J. Hsu, Y. Lai, and L. I., *Phys. Rev. E* **58** (1998) 6947.
- [8] Y. Lai and L. I., *Phys. Rev. B* **60** (1999) 4743.
- [9] V R Misko, H J Zhao, F M Peeters, V Oboznov, S V Dubonos, and I V Grigorieva, *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 034001.
- [10] L. R. E. Cabral and J. A. Aguiar, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 214533.
- [11] L. F. Chibotaru, A. Ceulemans, V. Bruyndoncx, V. V. Moshchalkov, *Nature* **408** (2000) 833.
- [12] N. Kokubo, S. Okayasu, T. Nojima, H. Tamochi, and B. Shinozaki, *J. Phys. Soc. Jpn* **83** (2014) 083704.
- [13] N. Kokubo, H. Miyahara, S. Okayasu, and T. Nojima, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84** (2015) 043704.
- [14] 小久保伸人, *固体物理*, **594**, No.8 (2015) 437.
- [15] H. J. Zhao, V. R. Misko, and F. M. Peeters, V. Oboznov S. V. Dubonos, and I. V. Grigorieva, *Phys. Rev. B* **78** (2008) 104517.
- [16] Unpublished.
- [17] M. V. Milošević, G. R. Berdiyrov, and F. M. Peeters, *Appl. Phys. Lett.* **91** (2007) 212501.
- [18] R. Geurts, M. V. Milošević, and F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 174508.