

# 外部磁界の二次元走査による Nb 超伝導トンネル接合と dc-SQUID の評価

渡邊 騎通\* 穴田 哲夫\*\* 中山 明芳\*\*\*

## Characterization of Nb superconducting tunnel junction and dc-SQUID by two-dimensional scan of external magnetic field

Norimichi Watanabe\* Tetsuo Anada\*\* Akiyoshi Nakayama\*\*\*

### 1. 緒言

二つの超伝導体で薄い絶縁層を挟んだ構造をしている素子を超伝導トンネル接合（ジョセフソン接合）という。超伝導体をエレクトロニクスに応用する際には、ジョセフソン接合を作製する必要があり、ジョセフソン接合は、高感度な磁気センサである SQUID (Superconducting QUantum Interference Device: 超伝導量子干渉素子) や超高速・低消費電力を実現できる SFQ (Single Flux Quantum: 単一磁束量子) 回路などに応用される[1, 2]。ジョセフソン接合を流れるジョセフソン電流は、外部磁界によって変調されるが、通常、ジョセフソン電流の外部磁界変調特性は、接合面に平行に外部磁界を一方から印加することにより測定し、接合の評価が行われる[3]。それに対して我々は、接合面に平行に二方向から外部磁界を印加して接合の評価を行ってきた[4-8]。外部磁界を二次元走査することにより、ジョセフソン電流の磁界変調特性について、一次元で外部磁界を走査するよりも格段に多くの情報を得ることが可能である。例えば、ジョセフソン接合の接合形状が変化すると、ジョセフソン電流の外部磁界変調特性も接合形状に依存して変化するが、外部磁界を二次元走査して磁界変調特性を測定した方が、ジョセフソン電流の外部磁界変調特性の接合形状依存性を明瞭に観測することができる[9]。また、ジョセフソン接合に垂直磁界を印加したときのジョセフソン電流の垂直磁界依存性についても、垂直磁界  $H_z$  に加えて、平行な外部磁界 ( $H_x, H_y$ ) を二次元走査してジョセフソン電流の磁界変調特性を測定した方が、ジョセフソン電流の垂直磁界依存性を詳しく解析することができる[10-14]。垂直磁界を印加したときのジョセフソン電流の磁界変調特性に関する研究は、報告例が少なく[15, 16]、垂直方向の一方向のみから外部磁界  $H_z$  を印加してジョセフソン電流の磁界変調特性を測定しても、超伝導薄膜への磁束トラップによりジョセフソン電流が垂直磁界  $H_z$  に対して不可逆的に変調されることしかわからないが、垂直磁界  $H_z$  に加えて、接合面に平行な磁界の成分 ( $H_x, H_y$ ) 磁界を印加して測定することにより、ジョセフソ

ン電流が垂直磁界  $H_z$  に対してなぜ変調されるのかについて、より多くの情報を得ることができる。本研究では、ジョセフソン接合を二つ並列に接続した構造をしている dc-SQUID を作製し、接合面に平行な外部磁界 ( $H_x, H_y$ ) を二次元走査して超伝導電流を変調する手法を用いて、dc-SQUID を流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性について調べた。

### 2. 実験方法

超伝導トンネル接合は、超伝導電極を Nb、バリア層に Al 酸化物を用いたものが最も多く作製されている[17]。本研究でも、Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb 構造のジョセフソン接合を作製した[18]。dc マグネトロンスパッタリング装置によって、Si 基板の上に Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb の積層膜を作製した。トンネルバリア層は、Al 層を純酸素中で自然酸化することにより作製した。Base Nb 層、Al 層、Counter Nb 層、Wiring Nb 層の膜厚は、それぞれ 300 nm、5 nm、50 nm、100 nm である。フォトリソグラフィと陽極酸化法により接合領域を形成し、ジョセフソン接合を作製した[19]。dc-SQUID は、図 1 に示すように Wiring Nb 層の下に二つのジョセフソン接合が配置されるようにして作製した。液体ヘリウムを用いて作製した試料を超伝導状態にし、ジョセフソン接合の接合面に平行に外部磁界  $H_x, H_y$  を二方向から印加して dc-SQUID を流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性を測定した。

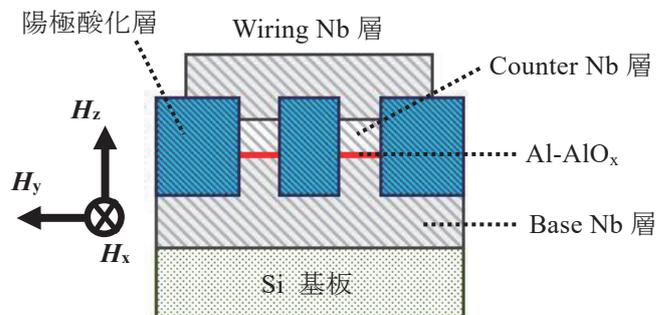


図 1 作製した dc-SQUID の構造

\*特別助教 電気電子情報工学科

Assistant Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

\*\*名誉教授 電気電子情報工学科

Professor Emeritus, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

\*\*\*教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

3. 実験結果

ジョセフソン接合の接合面に平行に一方から外部磁界を印加してジョセフソン電流の変調を行った場合は、図2に示すようなフラウンホーファーパターンが観測される。印加する平行磁界を大きくしていくと、接合に加わる磁束が磁束量子  $\Phi_0$  の整数倍になるごとに接合全体を流れる超伝導電流の値が0になりながら減少していく。これは、外部磁界を印加すると、接合内の電流分布が変化し、結果として接合全体を流れる超伝導電流の値が印加する外部磁界の大きさによって変化するからである[3]。さらに、接合面に平行に二方向から外部磁界を印加すると、図3に示すように  $H_x$  方向と  $H_y$  方向の二方向にフラウンホーファーパターンが観測されるようになる。

本研究では、このジョセフソン接合を二つ並列に接続して dc-SQUID を作製し、dc-SQUID を流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性の測定を行った。測定に使用した dc-SQUID は、dc-SQUID を構成するジョセフソン接合の大きさが  $50 \mu\text{m}$  角、二つのジョセフソン接合間の距離も  $50 \mu\text{m}$  である。また、 $H_x$  磁界、 $H_y$  磁界ともに、 $40 \text{ A/m}$  の磁界ステップで外部印加磁界を変調させた。dc-SQUID と印加する外部磁界( $H_x, H_y$ )の関係を図4に示す。 $H_x$  磁界は dc-SQUID の超伝導ループに鎖交するように印加し、 $H_y$  磁界は、dc-SQUID を構成するジョセフソン接合に鎖交するように印加する。このような方法で dc-SQUID に流れる超伝導電流を変調して測定した結果を図5に示す。( $H_x, H_y$ )平面の原点付近に観測されるフラウンホーファーパターンのメインピークや、メインピーク周辺のサブピーク内に、さらに小さな電流の変調周期が観測されている。

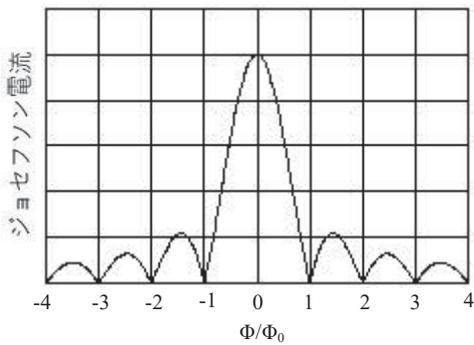


図2 ジョセフソン電流の磁束依存性 (数値計算)

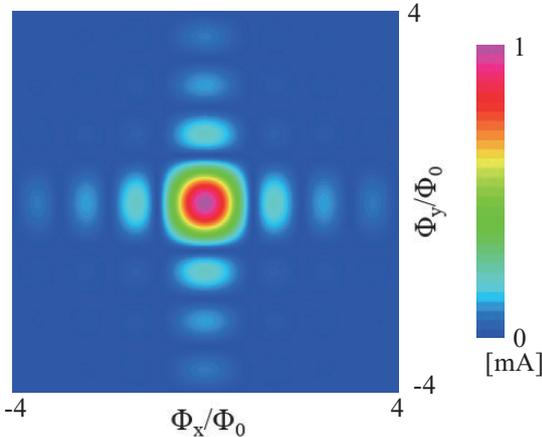


図3 ジョセフソン電流の磁束依存性 (数値計算)

図6に、 $H_y = 0$  のときの  $H_x$  磁界に対する超伝導電流の磁界変調特性を示す。 $H_x$  磁界は、 $5 \text{ A/m}$  の磁界ステップで変調させている。フラウンホーファーパターンと SQUID の超伝導ループで捕えた外部磁束によって変調される超伝導電流の短い変調パターンが重畳された特性が明瞭に観察できている。ジョセフソン接合に印加された磁束によるフラウンホーファーパターンの変調周期が  $200 \text{ A/m}$  程度で、SQUID の超伝導ループに鎖交する磁束による超伝導電流の変調周期が  $30 \text{ A/m}$  程度となっている。

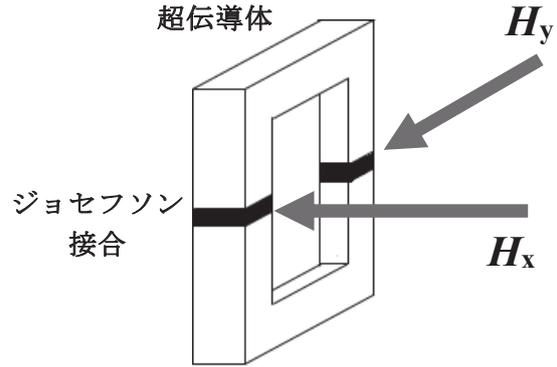


図4 dc-SQUID と外部印加磁界の関係

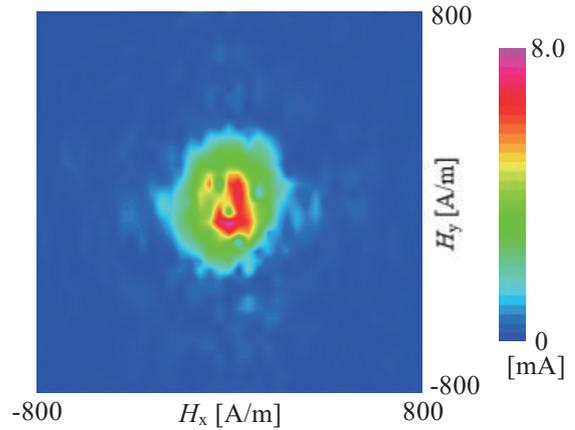


図5 dc-SQUID を流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性 (接合間の距離は  $50 \mu\text{m}$ )

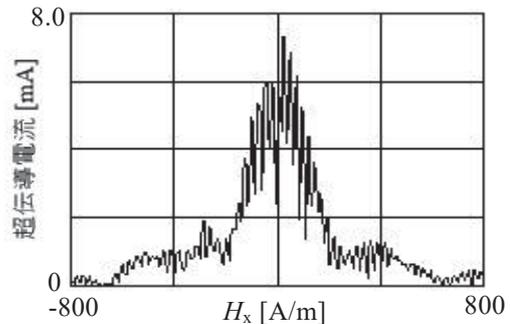


図6 dc-SQUID を流れる超伝導電流の磁界変調特性 (接合間の距離は  $50 \mu\text{m}$ , 外部印加磁界  $H_y = 0$ )

ジョセフソン接合に印加される外部磁束によって変調されるジョセフソン電流の変調パターンは、図2に示したようなフラウンホーファーパターンになる。それに対して、dc-SQUIDの超伝導ループに鎖交する磁束によって変調されるdc-SQUIDを流れる超伝導電流の変調パターンは、図7に示すように周期的に超伝導電流が振動する特性となる。SQUIDの超伝導ループの大きさに対して、ジョセフソン接合のサイズが大きいときは、ジョセフソン接合を流れる超伝導電流のフラウンホーファーパターンとdc-SQUIDの超伝導電流の変調パターンが重畳され、図8に示すような特性になる。ジョセフソン接合のフラウンホーファーパターンの変調周期は、接合のサイズに依存し、dc-SQUIDを流れる超伝導電流の変調周期は、SQUIDの超伝導ループのサイズに依存する。

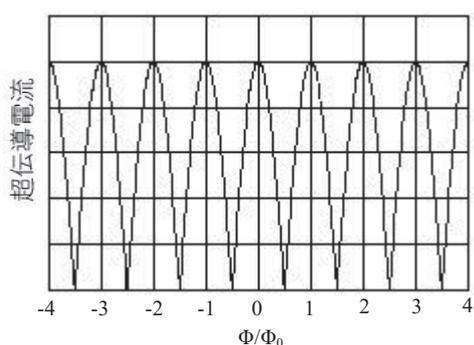


図7 dc-SQUIDを流れる超伝導電流の磁束依存性 (数値計算)

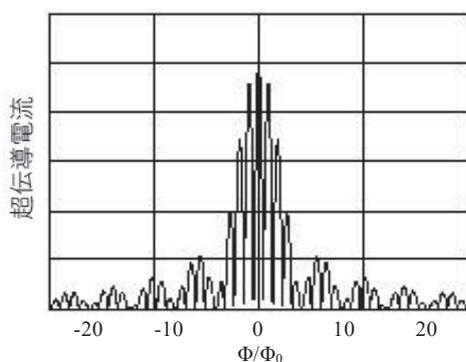


図8 dc-SQUIDを流れる超伝導電流の磁束依存性。超伝導ループの大きさに対して、ジョセフソン接合のサイズが大きいときの特性 (数値計算)

図9は、dc-SQUIDを構成するジョセフソン接合の大きさが $50\ \mu\text{m}$ 角、二つのジョセフソン接合間の距離が $150\ \mu\text{m}$ のdc-SQUIDを流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性である。二つのジョセフソン接合間の距離が、図5で測定した試料よりも大きいため、外部磁束を捕えるdc-SQUIDの超伝導ループの面積が大きくなり、超伝導ループに鎖交する磁束によって変調される超伝導電流の変調周期は、図5の試料よりも小さくなるはずである。しがしながら、図9の測定においても、 $H_x$ 磁界、 $H_y$ 磁界の磁界変調ステップは図5の測定と同じ $40\ \text{A/m}$ の磁界ステップで測定したため、超伝導ループに鎖交する磁束によって変調される超伝導電流の変調周期が、外部

磁界 $H_x$ の変調ステップ $40\ \text{A/m}$ よりも小さくなるため、図5と比較しても超伝導電流の二次元磁界変調特性に大きな変化は見られなかった。そこで、図6の測定と同じように、 $H_x$ 磁界の変調ステップを $5\ \text{A/m}$ にして、 $H_y=0$ のときの超伝導電流の磁界変調特性を測定した。測定結果を図10に示す。dc-SQUIDを流れる超伝導電流の小さい方の変調周期は $20\ \text{A/m}$ 程度となっている。二つの接合間の距離が広がり、超伝導ループでより多くの磁束を捕えられるようになったので、図6の測定結果と比較して超伝導電流の変調周期がさらに小さくなっていることがわかる。

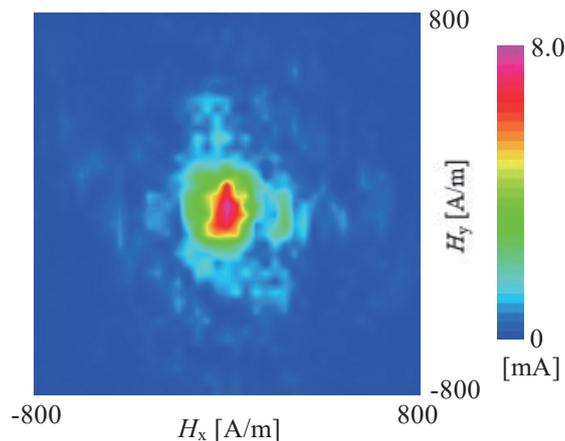


図9 dc-SQUIDを流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性 (接合間の距離は $150\ \mu\text{m}$ )

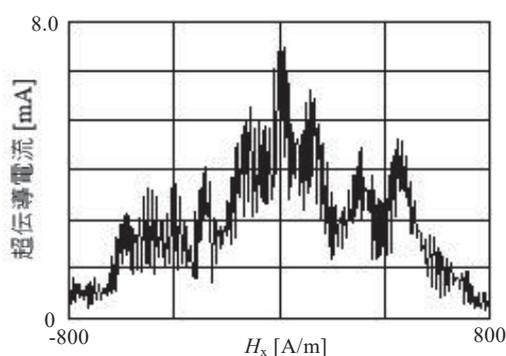


図10 dc-SQUIDを流れる超伝導電流の磁界変調特性 (接合間の距離は $150\ \mu\text{m}$ , 外部印加磁界 $H_y=0$ )

#### 4. まとめ

Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合を作製し、接合面に平行に外部磁界を二方向から印加することにより接合を流れる超伝導電流を変調して、ジョセフソン電流の二次元磁界変調特性を測定している。本研究では、ジョセフソン接合を並列に接続したdc-SQUIDの構造をした試料を作製し、dc-SQUIDを流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性を測定した。dc-SQUIDの二次元磁界変調特性では、超伝導ループで捕捉した外部磁束によって変調される超伝導電流の変調パターンと、dc-SQUIDを構成するジョセフソン接合が捕捉する外部磁束によって変調されるジョセフソン電流の変調パターンが重畳さ

れた特性が得られた。さらに、dc-SQUID を構成する二つの接合間の距離を大きくすることにより、外部磁束を捕獲する超伝導ループの面積が大きくなり、その結果として dc-SQUID を流れる超伝導電流の外部磁界に対する変調周期が小さくなることがわかった。

#### 参考文献

- [1] J. Clarke and A. I. Braginski, *The SQUID handbook*, WILEY-VCH (2004).
- [2] K.K. Likharev and V.K. Semenov, RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1, 3-28 (1991).
- [3] Barone and G. Paterno, *Physics and Applications of the Josephson Effect*, Wiley-Interscience, New York (1982).
- [4] A. Nakayama, S. Abe, T. Morita, M. Iwata, and Y. Yamamoto, Modulation of Josephson Current of Nb Junctions by Two-Dimensional Scan of External Magnetic Field, *IEEE Trans. Magn.* 36, 3511-3513 (2000).
- [5] A. Nakayama, S. Abe, T. Shoji, R. Aoki, N. Watanabe, Modulation of I-V curves of Nb single and double junctions by 2D scan of magnetic field, *Physica B*, 329-333, 1493 (2003).
- [6] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Two-dimensional magnetic field dependence of Josephson current and resonant current steps at finite voltage of square shape superconducting tunnel junctions, *J. Appl. Phys.*, 111, 113907 (2012).
- [7] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Y. Okabe, Two-dimensional magnetic field dependence of zero and finite voltage steps in current-voltage characteristics of rectangular shape niobium tunnel junctions, *Microelectron. Eng.* 108, 163-168 (2013).
- [8] A. Suzuki, A. Nakayama, S. Abe and N. Watanabe, Restoration of the Josephson Current by Applying a Vertical Magnetic Field, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 28, 1200105 (2018).
- [9] N. Watanabe, A. Nakayama, S. Abe, S. Kawai, Y. Nishi, and K. Masuda, The shape dependency of two-dimensional magnetic field dependence of a Josephson junction, *J. Appl. Phys.*, 103, 07C707 (2008).
- [10] N. Watanabe, A. Nakayama, S. Abe, Influence of trapped magnetic flux quantum on two-dimensional magnetic field dependence of a Josephson junction, *J. Appl. Phys.*, 101, 09G105 (2007).
- [11] N. Watanabe, A. Nakayama, S. Abe, K. Masuda, Measurement of perpendicular magnetic field dependence of the Josephson current by a three-dimensional scan of the external magnetic field, *J. Phys. Conf. Ser.*, 234, 042038 (2010).
- [12] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe and Y. Okabe, Anomalous modulation characteristics of DC Josephson current through niobium tunnel junction by applying external magnetic field 4000 A/m in perpendicular direction, *Microelectron. Eng.* 108, 93-98 (2013).
- [13] N. Watanabe, S. Abe, and A. Nakayama, Modulation of a Josephson current through an Nb/Al-AIOx/Nb Josephson junction by a parallel magnetic field and perpendicular magnetic field, *J. Appl. Phys.*, 116, 033920 (2014).
- [14] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Deviation From Fraunhofer-Type Modulation of Josephson Current Through Niobium Tunnel Junctions by Applying Vertical Magnetic Field, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26, 1100606 (2016).
- [15] S. L. Miller, Kevin R. Biagi, John R. Clem, and D. K. Finnemore, Critical currents of cross-type superconducting-normal-superconducting junctions in perpendicular magnetic fields, *Phys. Rev. B*, vol. 31, 2684-2693 (1985).
- [16] O. B. Hyun, D. K. Finnemore, L. Schwartzkopf, and J. R. Clem, Elementary pinning force for a superconducting vortex, *Phys. Rev. Lett.* 58, 599 (1987).
- [17] Y. Tarutani, M. Hirano, U. Kawabe, Niobium-based integrated circuit technologies, *Proc. IEEE*, 77, 1164-1176 (1989).
- [18] A. Nakayama, N. Inaba, S. Sawachi, K. Ishizu, Y. Okabe, Fabrication of Nb/AIOx/Nb Josephson Tunnel Junctions by Sputtering Apparatus with Load-Lock System, *IEICE Trans. Electron.* E77-C, 1164-1168 (1994).
- [19] H. Kroger, L. N. Smith, and D. W. Jillie, Selective niobium anodization process for fabricating Josephson tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 39, 280 (1981).