

超伝導体の非線形表面抵抗のミクロな理論

Field-dependent nonlinear surface resistance of superconductors

高エネ研¹, 総研大², ODU³ ○久保 毅幸^{1,2}, グレビッチ アレックス³KEK¹, Sokendai², ODU³ ○Takayuki Kubo^{1,2}, Alex Gurevich³

E-mail: kubotaka@post.kek.jp

超伝導のBCS理論に基づく表面抵抗の理論として Mattis-Bardeen (MB) の式が知られているが、導出過程からも明らかなように、MB 公式は、場が弱い極限かつ理想的な BCS 準粒子状態密度を持つ超伝導体に対してのみ適用可能である。すなわち、考えられる限り最も簡単な場合にしか適用できない。一方、現実の超伝導体では、電流、磁性不純物、物質表面の薄い常伝導層など、様々なペア破壊機構が不随するため、MB 公式が定性的にさえ正しい結果を与えない場合が多々ある。

代表的な例が、粒子加速器用の超伝導ニオブ共振空洞である。現代のニオブ共振空洞は、周波数 ≈ 1 GHz、温度 2K において、表面抵抗は $R_s \sim 1$ n Ω -10 n Ω 、 Q 値にして $Q_0 \sim 10^{10}$ - 10^{11} に到達する。加速電場は ≈ 50 MV/m に達し、この時、内表面を流れる遮蔽電流は depairing current density に匹敵する。超伝導空洞は Meissner 状態で運転されることに加え、冷却時にトラップされる磁束は無視できる程に少ないため、磁束の運動による損失は無視できる。温度 2K 付近での空洞の表面抵抗は準粒子によるマイクロ波光子の吸収で決まる。この表面抵抗あるいは Q 値は空洞内面を流れるマイクロ波電流あるいは対応する表面磁場 H に強く依存するため、 $R_s = R_s(H)$ あるいは $Q = Q(H)$ と書ける。この非線形 $R_s(H)$ 及び $Q(H)$ は表面処理の方法に敏感である。例えば、電解研磨を施しただけの共振空洞では、マイクロ波強度の増加とともに Q 値が減少する。一方、窒素ドーピングと呼ばれる処理方法では、マイクロ波電流が depairing current density の半分程度に達するまで Q 値が改善し続ける。他にも様々な表面処理方法が見つかり、それぞれ異なる非線形性を生む事が知られているが、MB 理論は表面磁場 $H \rightarrow 0$ にしか適用できないため全くの無力である。更に、材料表面に存在する常伝導の suboxide の存在など表面処理で影響を受けるであろう様々な要素は MB 理論では取り扱えない。このような多彩な非線形性の背後にある物理を説明できる表面抵抗理論の構築は、50 年以上に亘る課題であった。

最近になり、非線形 $R_s(H)$ の理論が大きく前進しつつある。本発表では、電流、磁性不純物、物質表面の薄い常伝導層などの様々なペア破壊機構を考慮した場合の、BCS 理論に基づく $R_s(H)$ の理論を紹介する [1,2,3]。理想的な BCS 超伝導体（すなわち、表面の常伝導の層、サブギャップ状態密度、磁性不純物のいずれも存在しないような超伝導体）の R_s は、場の増大とともに減少し、 $H \sim 0.3$ - $0.4H_c$ で最小値を取り、再び増加に転ずる [1]。しかし、物質表面の様々なペア破壊機構を考慮した場合、 $R_s(H_0)$ の最小値を与える H_0 がずれる等、様々な非線形 $R_s(H)$ 曲線が生じる [2,3]。これは現実の共振空洞の $R_s(H)$ 曲線の最小値の位置が表面処理方法に依存してずれる或いは消失する事実と符合する（これらは全て BCS 理論の帰結として得られた事を強調しておく）。共振器材料の準粒子状態密度測定などによって上記の非理想性に対応するパラメータを抜き出し、理論が示す最適値になるよう表面処理や製膜方法にフィードバックをかけることで、 R_s や Q の改善が可能だろう。

[1] A. Gurevich, Phys. Rev. Lett. **113**, 087001 (2014).[2] A. Gurevich and T. Kubo, Phys. Rev. B **96**, 184515 (2017).[3] T. Kubo and A. Gurevich, Phys. Rev. B **100**, 064522 (2019).