

超伝導接合系における近接効果

日大生産工（非常勤） ○吉田 亘克 日大生産工 山城 昌志

1 まえがき

金属の超伝導現象は、1911年、オランダの H. K. Onnesによって発見された。永久電流が最も注目される現象であるが、より本質的なのは超伝導体内から完全に磁束を排除する完全反磁性と呼ばれるマイスナー－オクセンフェルト効果である。この効果の現れ方によって超伝導体は第1種と第2種に分類される。また、理論的な解明は、現象が発見されてから46年後の1957年に、Bardeen、Cooper、及びSchriefferらによるBCS理論の登場まで待たなければならなかった(1)。BCS理論によると、温度の低下とともに、電子間には格子振動（フォノン）を媒介にした引力相互作用が優勢になり、2つの電子が対を組み（Cooper対の形成）ボソンとしての性質を示すようになる。このボソン（Cooper対）がボース・アインシュタイン凝縮を起こすのが超伝導相転移である。この状態は、多数の電子がCooper対を組む事である一つの量子状態に落ち込む（凝縮する）事であたかも一つの巨大な粒子のように振舞っている状態で、超伝導状態を記述する波動関数を巨視的波動関数、超伝導状態を巨視的量子状態と呼ぶ所以である。その一つの現れとして第2種超伝導体を示す磁束の量子化という現象がある。

このように、超伝導体は単体でも多彩な電磁気学的現象を示すのだが、異種の物質や通常金属と接することで、巨視的波動関数のトンネル効果に由来した非常に興味深い現象を示す。例えば、超伝導体と金属を接合した超伝導体・金属接合系において、金属側に超伝導電子対を表す巨視的波動関数がトンネル効果によって染み出し、金属側も超伝導性を獲得することが知られている（図1）。この現象は超伝導近接効果と呼ばれ、超伝導体の基礎物理、応用的研究の双方において重要な研究課題の1つとされ、国内外で活発に研究が行われている(2)。実際、超伝導の基礎物理研

究の面では、走査型トンネル顕微鏡を用いた高温超伝導体の実験的研究と理論的研究の両面からCooper対の持つ対称性が明らかにされた(3)。また、近年の微細加工技術の発展に伴い、これまで互いに排他的であった磁性体とのハイブリット構造系なども作成されるようになり、接合境界領域における新奇な量子現象の発見や、次世代デバイスとして大きな期待が寄せられているスピントロニクスへの応用的研究も盛んに行われている(5-6)。

このような空間不均一な接合系を扱うには、波動関数を始め、様々な物理量の空間変化を定量的に扱わなければならない。それに最適な理論的手法として、準古典グリーン関数法があり、最も良く用いられる手法の一つである。数ナノメートルのスケールで空間を粗視化する事で、空間依存性を扱う準古典近似によるグリーン関数法である(7)。

今回の講演では、超伝導体・常伝導体接合系における近接効果について説明した後、超伝導体・強磁性体ハイブリット系におけるスピン依存型近接効果について発表する。

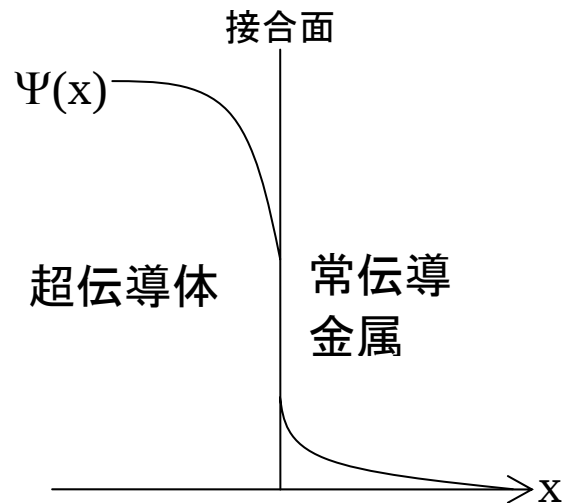


図1 超伝導体・金属接合面におけるCooper対の波動関数 Ψ の染み込み（近接効果）。

Theoretical Investigation of the Proximity Effects at the Junction Between Superconductors and Metals

Nobukatsu YOSHIDA and Masashi YAMASHIRO

2. モデル

近接効果の特徴を調べる上で最も単純なモデルとして、不純物を含まないクリーンな超伝導体・常伝導体（または強磁性体）の二次元の接合系を考え、接合界面は散乱過程において縦方向の運動量が保存するフラットなものとする。また、超伝導を引き起こす引力相互作用は超伝導体のみが存在し、常伝導体や強磁性体での引力相互作用は考慮しない。この様に比較的単純化したモデルにおいても、適した境界条件の下でCooper対の波動関数（秩序変数）の空間変化（図1）を自己無撞着に決定することは困難な問題である。そこで我々は、上に述べたこの問題に対して現在最も適した手法の一つとして知られるランダウのフェルミ流体論を一般化した準古典グリーン関数法に基づき計算を行う。

3. 結果

超伝導体・常伝導体接合系における秩序変数の空間変化の界面バリア依存性の振る舞いを図2に示す。

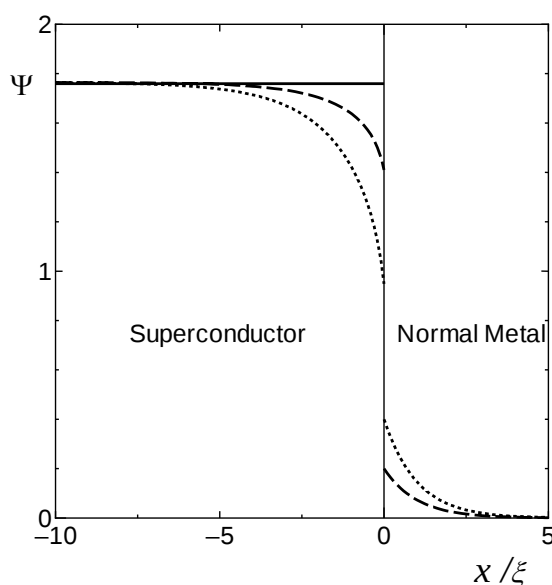


図2 超伝導体・常伝導体接合系における秩序変数 Ψ の空間変化の界面バリア依存性。

この結果から、界面バリアの強さの減少（実線から点線）に伴い常伝導体側へ染み込む超伝導体の秩序変数が増加する傾向が見られる。また超伝導体側においては秩序変数の減少が見られる。こうした界面近傍における超伝導体の秩序変数の減少は、対破壊を引き起こす界面の場合においても見られる。対破壊を引き起こす界面は、強くスピン偏極した強磁性体（例えばハーフメタル）との接合で起こりえる。スピン偏極した界面での散乱過程においてCooper対を

担う電子のスピンが回転し、互いに反平行な関係であった2つの電子のスピン間のバランスが壊されるのが原因である。一見、近接効果に関係のないように思われる現象であるが、強磁性体での接合では新奇な近接効果を引き起こす要因となる。1つの例として、ハーフメタルと超伝導体との接合系における近接効果についての計算も行った。その結果、界面でのスピン散乱によって、界面近傍で超伝導性と磁性が共存することを明らかにした。本公演では、このスピン依存型近接効果の最近の成果についても紹介したい。

「参考文献」

- 1) J.Bardeen, L.N.Cooper and J.R. Schrieffer, Phys.Rev.108,1175(1957)
- 2) G. Deutcher and P.G.deGennes,in Superconductivity ed.R.D.Parks (Marcel Dekker, Inc., New York, 1969),p.1005.
- 3) Y.Tanaka and S.Kashiwaya, Phys.Rev.LettVol.74No.17.pp3451-3454, 1995
- 4) M.Eschrig et al, Phys.Rev.Lett.90,137003 2003
- 5) Serene, J.W. and Rainer. D Phys. Reports 101 222, 1983