

論文内容の要旨

論文題目 Transport phenomena of mesoscopic ferromagnet –
superconductor hybrid junctions

(メソスコピック強磁性-超伝導接合の輸送現象)

氏 名 石 井 裕 司

常伝導(N)-超伝導(S)接合系において常伝導側から電子($E < \Delta$)が入射するとき、超伝導体中では Cooper pairとして存在しなくてはならないという要請から 速度ベクトルおよびスピンの反対向きのもう一つの電子が同時に入射しなくてはならない。この状況は見方を変えれば N-S界面で入射電子が holeとして反射されると解釈でき、Andreev 反射と呼ばれている。この入射電子と反射 hole は超伝導体の位相をも反映した位相をもつが N-S 界面から距離 $\sim \sqrt{\hbar D/2\varepsilon}$ (D はN中の diffusion constant, ε は入射電子のエネルギー)程度のところで両者はコヒーレンスを失う。一方で超伝導状態の常伝導体側へのしみだしは超伝導近接効果として知られているが、この Andreev 反射における入射電子と反射 hole のコヒーレンスはその起源であると理解でき 通常金属の場合 超伝導がN側へしみだす長さは $\xi_N = \sqrt{\hbar D/2\pi k_B T}$ で与えられる。Agなどの通常金属の薄膜の場合、この長さは1K以下で0.1 μm のオーダーとなるので 近年めざましく発展した微細加工技術を用いれば、超伝導のしみだしの長さを直接反映した効果を観測することが可能となった。その1つが抵抗のリエントラントと呼ばれる現象で、超伝導転移温度 T_c 以下で減少したN-S系の抵抗は、常伝導体の reservoir と超伝導体との距離 L で定義される Thouless energy $\varepsilon_{Th} = \hbar D/L^2$ 程度以下の温度領域で増大に転じ、理論上は $T=0$ では常伝導のときの抵抗値に戻るというものである。そしてここ数年 近接効果の興味は強磁性(F)-超伝導(S)接合系に移ってきている。この場合 F中における交換相互作用の結果、超伝導状態のしみだしの長さは $\xi_F = \sqrt{\hbar D/2I_{exch}} \cong \sqrt{\hbar D/2\pi k_B T_{Curie}}$ となり、この値はNiなどの典型的な強磁性体では数nmであるので N-S系におけるような長距離の近接効果は期待できない。ところが1994年に Petrashovらが 図1のような形状をしたNiとSnを用いた試料においてSnからの距離(0.3~2.0 μm)に依存して T_c 以下で抵抗が増加したり減少したり

するという報告を行っている。(ただし付け加えるならば彼らは同様の振る舞いを N-S 系でも観測しているが、抵抗が T_c 以下でいきなり増加するというのは明らかに従来の理論に反しており現在も解釈には至っていない。また他の実験グループによる同様の報告はない。) さらに近年、測定領域に F-S 接合を含んだ系の抵抗の温度依存性において、リエントラント効果と似た振る舞いが報告されたり (ただし、抵抗の極小値が理論上予想されるよりも高い温度で現れたり、また最低温度での抵抗値が常伝導のときの値を

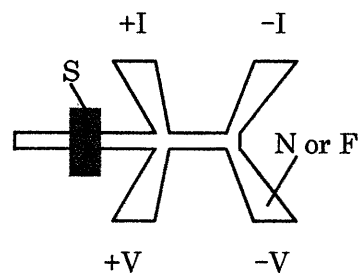


図 1

上回るなど従来のリエントラント効果の描像に反する点もある)、また T_c 以下での抵抗の減少量が超伝導体の部分の超伝導転移による抵抗の減少および ξ_F 程度の超伝導のしみだしでは説明できないほど大きいとする報告もあり、N-S 接合系の場合と同様 F-S 接合系においてもサブミクロン程度の長距離近接効果が存在する考えが支配的であった。しかし最近 Belzig が発表した理論によりこの状況は一変する。それは F-S 界面での Andreev 反射と界面付近での spin accumulation の効果を考えるだけで、長距離の近接効果がなくても上記のリエントラント効果と似た振る舞いは従来のリエントラント効果と矛盾していた点も含めて再現でき、また T_c 前後での界面近傍の抵抗変化量は界面抵抗のオーダーになることから、界面抵抗の値がそれなりに大きいとするならば先の実験における T_c 以下での大きな抵抗の減少をも説明できるというものである。したがって F-S 接合系における長距離近接効果の有無に関する議論はふりだしに戻ったというのが現状である。

以上の経緯をふまえ、F-S 接合系の近接効果を原点から検証するというのが本研究の主旨であるが、その際に我々は従来の実験以上に透過性の高い N(F)-S 界面を作製することに留意した。従来この分野の実験では N 部と S 部をそれぞれ別個の電子線リソグラフィ+蒸着で作製していた。ただし、このままでは N-S 界面に現像液で除去しきれなかったレジストや蒸着装置から取り出したときに吸着した不純物が残り、清浄な界面は期待できない。そこで S 部を蒸着する直前に Ar+スパッタで N 表面の不純物を除去するという手法をとっていた。しかしスパッタによる洗浄は不純物と同時に N 表面をも削り取ることになり逆に界面の roughness を生じ透過性を悪くする結果となりかねない。この手法はいかなる複雑な N-S 構造をも作製できるという利点があるが、我々はこういった理由により採用せず微小トンネル接合系の実験で一般的に用いられている電子線リソグラフィ+斜め蒸着法を採用することにした。

この方法は蒸着過程で高真空を破ることなく異種金属の接合を作製することができるので、現状では界面の清浄さに関してはベストな手法と考えられる。また測定部分に N-S 界面が含まれるような構造では上述のような紛れがあるので図 1 のように N-S 界面から空間的に離れた領域の近接効果が観測できればベストでありそのためには S と測定部をできるだけ近づけたい。

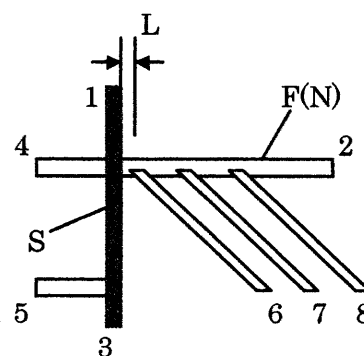


図 2

そこで斜め蒸着を多方向からできるように改良し図2のような試料を作製した。Sと最近接プローブ6との距離Lは $0.2\mu\text{m}$ 弱、6-7, 7-8間は $1.0\mu\text{m}$ である。今回Ni/AlとCu/AlさらにF-S接合系において長距離近接効果があるとしたら超伝導のtriplet成分によるものではないかという理論をふまえNi/Snの試料を作製し、測定を行った。(以下では図2の端子iからjに電流を流し端子kとlの電位差を測定した4端子抵抗を $R_{ij,kl}$ と表記する。また測定電流は特に断らない限り $0.1\mu\text{A}$ である。) $R_{12,67}$ と $R_{13,45}$ の温度依存性を図3に示す。Cu/Al系において観測された長距離近接効果はF/S系においては観測されなかった。 $R_{13,45}$ が2段階の超伝導転移をしているように見えるのはN(F)と重なったS領域の T_C が低下するという逆近接効果を反映していると考えられる。次にcross-junctionとしての抵抗 $R_{12,34}$ の温度依存性を図4に示す。N-S接合とF-S接合のいずれにも T_C とその低温側に計2つのピークが観測された。前者に関してはS領域におけるcharge imbalance効果によるものではないかと考え、検証実験を行った。それは図2においてNとSを入れ替えさらにプローブ6-8をNで作製するかSで作製するかで $R_{12,36}$ の温度依存性に現れるピークに変化があるかどうかということである。結果はプローブ6をNで作製すると T_C におけるピークは消滅し、charge imbalanceによる描像を裏付けることになった。一方、 T_C より低温側に出現した従来観測されたことのないピークに関してあるが、N(F)と接しているS領域の抵抗が0になる温度において現れることから我々はこのピークが接合を流れる電流の分布の変化に起因するものではないかと考え、事実S部の超伝導転移による抵抗値の減少の過程でこの $R_{12,34}$ が常伝導時の負の値から正の値へ変化することを電送線モデルを用いた計算により示した。これまでこのようなbarrierのほとんどないN(F)-S junctionの抵抗の温度依存性は数例報告されているが、いずれも T_C で1つピークが現れただけであった。それもそのはずで我々の試料作製法でNiを蒸着した後、1時間ほど蒸着装置内($\sim 10^{-7}\text{Torr}$)に放置してからAlを蒸着した試料の $R_{12,34}$ の温度依存性を測定したところ、 $T = T_C$ に1つピークが現れたのみであった。これは界面が極めて清浄でないとこの逆近接効果を反映した2ピーク構造は現れないことを示しており、このことから今回採用したプロセスにより作製した試料は従来の実験におけるものよりも清浄なF(N)-S界面をもっているといえる。

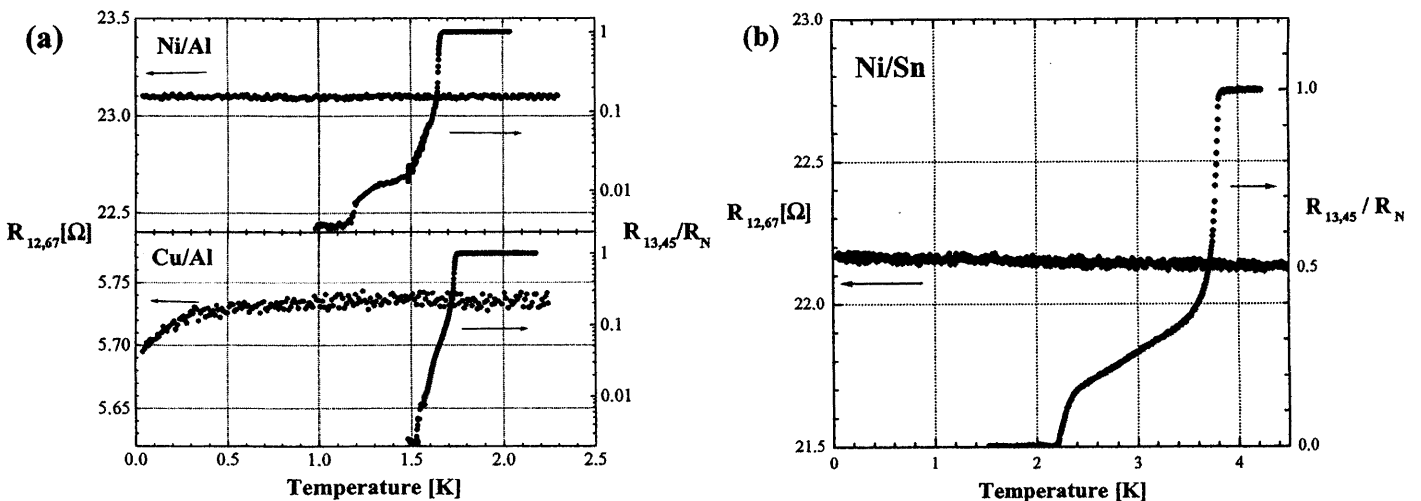


図3 $R_{12,67}$ の温度依存性 (a) Ni / Al, Cu / Al (b) Ni / Sn

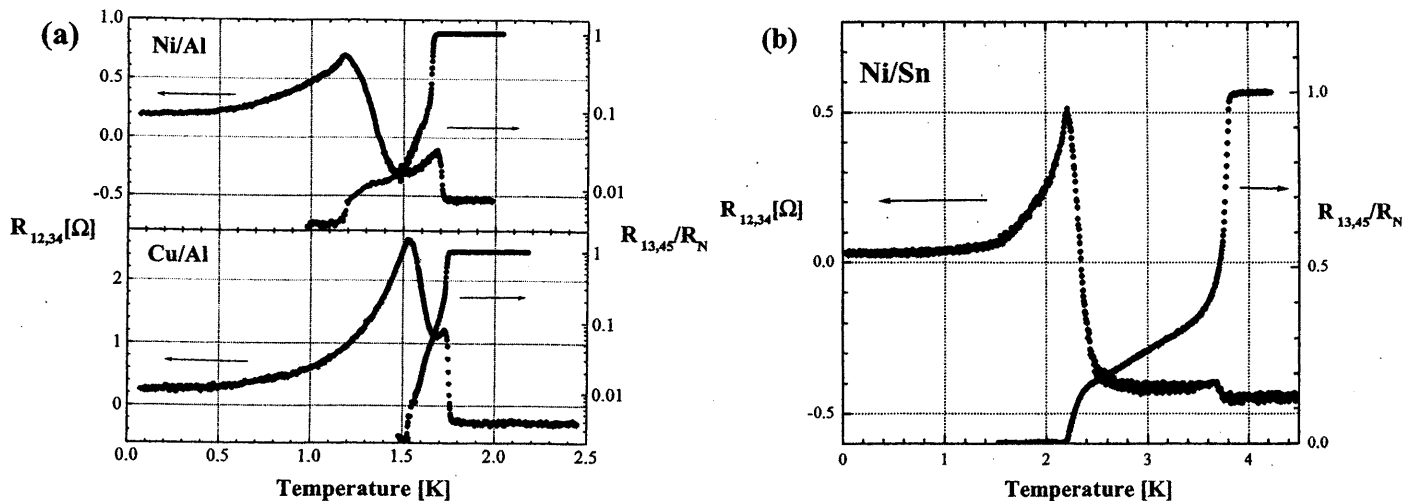


図4 $R_{12,34}$ の温度依存性 (a) Ni / Al , Cu / Al (b) Ni / Sn

$F(N)$ -S 界面を含んだ領域 $R_{12,46}$ の温度依存性を図5に示す。Ni/Al の抵抗変化は BTK 理論に従う界面抵抗の変化により電流分布が変化した結果のみで完全に説明できる範囲内である。一方 $0.1 \mu A$ での Ni/Sn の測定では Cu/Al で観測されたリエントラント効果と似た抵抗変化が観測されたが $R_{12,67}$ において近接効果が観測されていないことから、従来のリエントラントの描像では説明できない。しかし、 $1.0 \mu A$ でこの振る舞いが抑制されたことは何らかの近接効果に起因した現象であることを予感させる。またこの抵抗変化量は 界面抵抗の変化に付随するもの以外の寄与があることを完全に立証することはできなかったが Ni/Al と比較すると明らかに大きな変化を示しており、このことも Ni/Sn における超伝導の F 領域へのしみだしを暗示している。ただその場合でも超伝導のしみだしの長さは ξ_F 程度と概算され、したがって従来の実験で報告された F/S 系における長距離近接効果は 今回の試料では界面の透過性がそれらより優れているにもかかわらず観測されなかったということになる。だが、長距離近接効果を主張する従来の実験のほとんどは今回我々が行ったように界面抵抗値を正しく見積もり、その変化による影響を考慮することで近接効果がなくても十分説明できてしまうことから、F/S 系における長距離近接効果の存在は否定されるべきものと結論する。

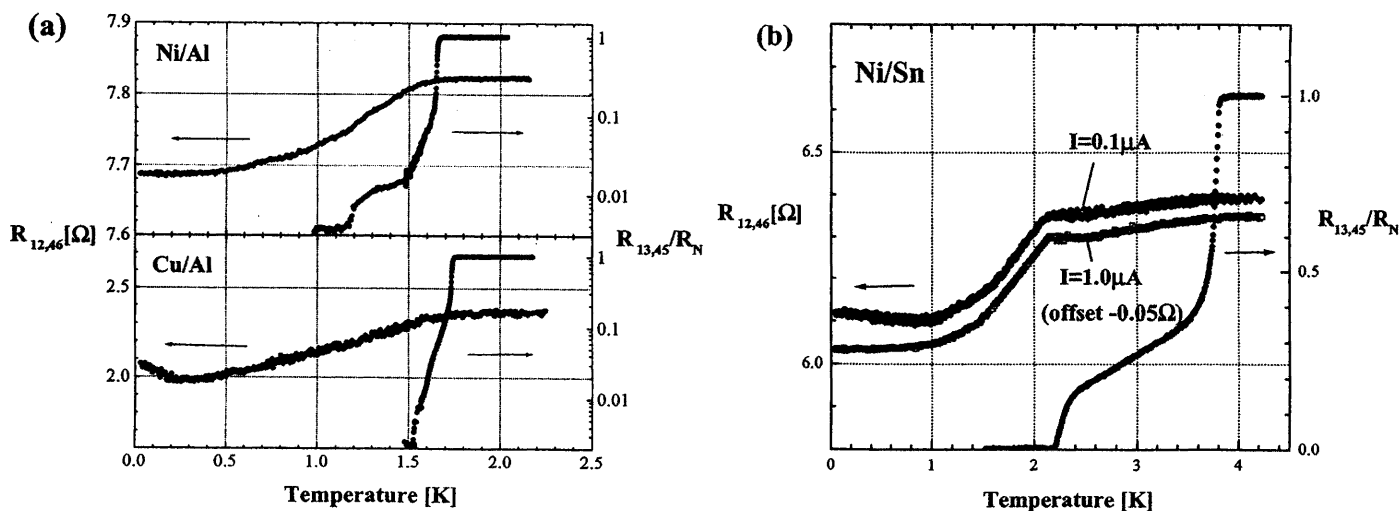


図5 $R_{12,46}$ の温度依存性 (a) Ni / Al , Cu / Al (b) Ni / Sn