

論文内容の要旨

論文題目 NMR Study of Superconducting Proximity Effects
in Ferromagnetic Metals
(強磁性金属における超伝導近接効果の核磁気共鳴による研究)

氏名 後藤 秀徳

(1) 序

固体物理において、超伝導と強磁性は電子の多体効果が現れる代表的な性質であり、いずれも転移温度以下で巨視的な秩序状態を形成する。これらの秩序は磁氣的にみれば互いに正反対の相互作用を起源としている。すなわち、強磁性体で働くスピンをそろえる相互作用は、超伝導体でのスピン-重項のクーパー対の形成を阻害する。磁性と超伝導の競合あるいは共存といった歴史ある問題を、人工的な構造制御によって解明しようとする試みが近年注目されている。それぞれの巨視的な性質は平均場理論で理解されているとおりが、これらのメゾスコピックな接合において新たに現れる電子物性が重要であり、かつ興味深いからである。一般の強磁性体-超伝導体接合においてはキュリー温度が超伝導転移温度よりも極めて大きいため、強磁性が超伝導性に及ぼす影響のみ考えられてきたが、我々は、超伝導性が強磁性に与える変化をとらえることに成功した。

強磁性体中では強い交換場によってクーパー対が破壊されるため、超伝導性は数十 Å 程度しか侵入できないと考えられてきた。超伝導秩序の振動しながら減衰する空間変化が予想されているが、その短さのため超伝導の侵入を直接観測することは困難である。この困難を克服するため、我々は Co/Al の 2 層膜における ^{59}Co -NMR の測定をおこない、超伝導性が侵入した強磁性体の電子状態を調べた。Co-NMR には、超微細相互作用を通じて電

子からのあらゆる情報が現れる。測定にもちいた Co の膜厚は 20Å で、交換場で壊されるとしても超伝導が侵入できると予想される長さ 12Å と同程度である。一方、Al の膜厚は 500Å で、超伝導のコヒーレンス長 400Å と同程度である。磁化と電気抵抗の測定から、この試料において強磁性と超伝導性が示された。コヒーレンス長が膜厚と同程度であること、したがって、超伝導秩序が試料全域に広がっていることを考慮すれば、Co における強磁性と超伝導性の共存が期待できる。

Co-NMR の利点の 1 つは、磁壁からの信号と磁区からの信号とを区別して得られることである。零磁場においては高周波磁場で振動する磁壁の位置にある核からの信号だけが得られるが、磁場をかけて磁壁を追い出せば磁区からの信号だけが得られる。このとき磁場は膜面に平行にかけるので超伝導転移には大きな影響を及ぼさないし、侵入長も変化しない。超伝導近接効果における磁壁の効果には、交換場の空間不均一に由来する局所超伝導領域の生成、さらには、三重項クーパ対の生成の可能性などが指摘されており、磁壁と磁区との超伝導近接効果を区別して調べることは極めて有意義である。

(2) 磁壁の NMR の結果

磁壁の NMR の結果、共鳴周波数とスピン格子緩和率の温度変化を図 1 に示す。それぞれ核スピンの静的・動的応答を反映する物理量であり、これらの T_c 以下での変化は Co への超伝導侵入を明確に示している。まず、Co 単体では共鳴周波数は温度によらないが、Co/Al 膜の共鳴周波数は T_c 以下で減少した。(図 1 左) 次に、Co の核スピン緩和率は磁壁内の位置に依存するため、単一の指数関数で表せないはずであるが、Co/Al 膜においては T_c 以下で緩和が単一の指数関数に近づく傾向が認められた。(図 1 右では磁壁中心における緩和の速い成分を白丸で、磁壁端における遅い成分を黒丸で示した。) 上述した 2 つの変化は、Co/Al 膜でも Co/Sn 膜でも共通にみられることから、超伝導近接効果による普遍的な振る舞いであろうと考える。

これらの結果は磁気モーメントが減少したと考えれば自然に説明できる。つまり、磁気モーメントの減少は、内殻電子の分極を減少させ、その結果共鳴周波数を減少させる。また、磁壁の熱揺らぎを増加させ、磁壁内の緩和をさらに速くする。磁壁端の緩和は、通常の BCS 超伝導体の核スピン緩和の温度依存性と類似していることから、核から伝導電子への直接の緩和を示していると考えられる。こうした強磁性電子状態の変化は、独立した 2 バンドモデル、つまり、 d 電子のみが磁性に寄与し、 s 電子のみが伝導に寄与するモデルによっては説明できない。 s - d 相互作用を考慮に入れることによって伝導電子の超伝導性が磁性に与える効果を取り込むことができる。 d 電子の遍歴性が強い極限として単一バンドモデルを採用し、Co 膜における自由エネルギーを GL モデルとストナーモデルおよびそれらの相互作用の和によってあらわした。相互作用の項には、超伝導の侵入により状

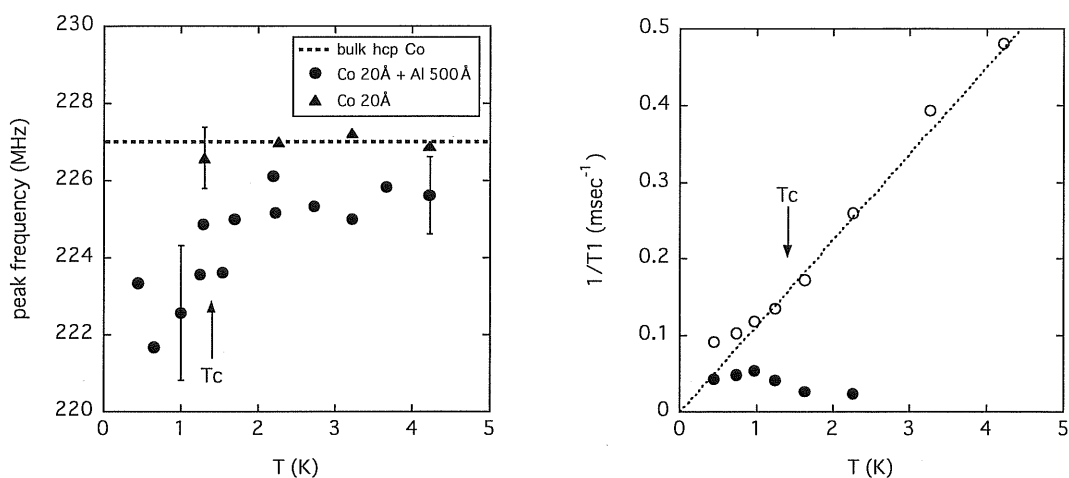


図1. Co-Al 2層膜の磁壁 NMR の結果

(左図) 共鳴周波数の温度変化 (右図) スピン格子緩和率の温度変化

態密度が減少し、スピン分極を減らす効果がふくまれる。このモデルを用いて磁気モーメントの減少を定性的に説明することができた。

(3) 磁化、緩和率の空間変化

上述のモデルは、磁気モーメントの空間変化をも予測する。そこで、不均一な系における NMR の特性を利用して、共鳴周波数を Co 核の位置に対応づけることを試みた。共鳴線形は、Co 膜 < 常伝導状態の Al/Co 膜 < 超伝導状態の Al/Co 膜、の順に低周波側へ大きく裾を引くことが観測された。このことから、より低周波側の共鳴に寄与する Co 核は Co/Al の境界のより近くに存在していると考えるのが自然である。この予想は、低周波への裾引きが Co 膜厚を増やした試料でも同様に観測されることから正当化された。綿密に校正された吸収曲線を用いて、共鳴周波数を境界からの位置に一对一に関係づけることができた。さらに、周波数をかえて核スピン緩和率を測定することによりその空間依存性を得た。図2に磁化と核スピン格子緩和率を境界からの距離の関数として表す。磁壁内の不均一磁場に由来する誤差を、単層膜の Co-NMR の吸収線幅から見積もった。図2左によると、常伝導状態 (2.0K) においてもすでに界面近傍の磁化は減少しており、その空間変化の特性長は約 5Å である。この減少の原因には界面における原子の混合のような構造上の欠陥、あるいは、非磁性な Al による近接効果で Co の磁化も減少する、という2つの可能性が指摘されている。超伝導状態 (0.5K) では、磁化は界面付近のみならず、試料全域にわたって減少していることを図から認めることができる。一方、核スピン格子緩和率も、図2右のように界面近くで減少することが示された。この結果も超伝導侵入による状態密度の減少によって矛盾無く説明できる。その空間変化の特性長は侵入長の計算値 12Å

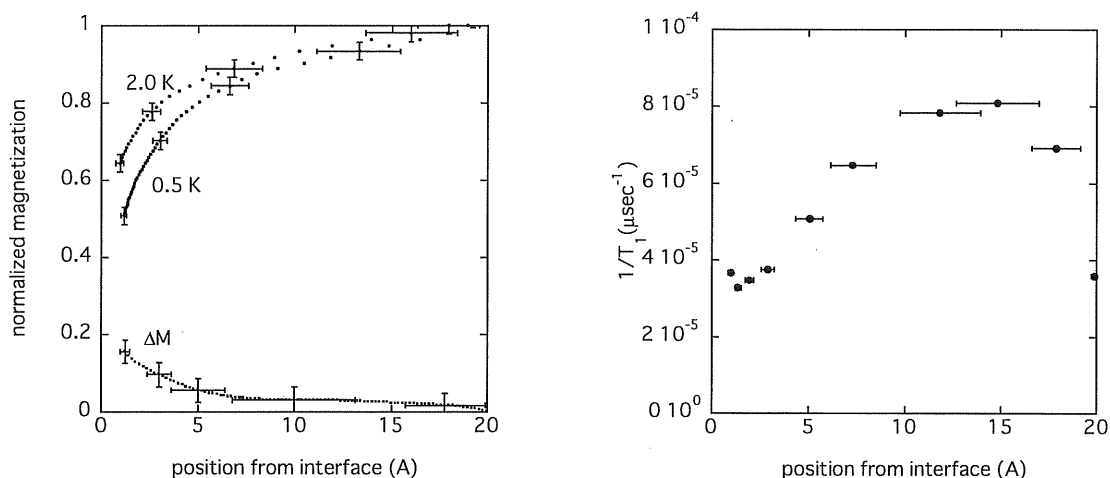


図2. Co-Al₂層膜の磁化とスピン格子緩和率の空間変化

(左図) 常伝導と超伝導状態の磁化とその差 (右図) 超伝導状態のスピン格子緩和率と同程度である。

(4) 磁区の NMR の結果

磁区の NMR の結果、まず、共鳴周波数の減少、すなわち、ここでも超伝導侵入による Co の磁気モーメントの減少がみられた。次に、磁区における核スピン緩和には、スピン波励起を介した伝導電子への緩和が寄与する。そのため緩和は指数関数的であり、 T_c 以上で温度に比例する。超伝導転移により、緩和率がこの比例関係から増大する方向にずれることを観測した。(図1右の白丸の温度変化に類似している。) これは、 T_c 下における磁気モーメントの減少のためにスピン波励起が増大し、緩和を増長したものであると説明できる。磁区における2つの測定量の T_c 上下での変化は磁壁の場合と比べていずれも少なかった。これは、磁壁のほうが磁区よりも超伝導の侵入に好ましい条件にあることを意味している。磁壁においては磁気モーメントの空間分布のために一重項クーパー対がみる平均の交換場が小さく、そのため超伝導の侵入長が増大するのだろうと考える。一方、磁壁・磁区における両結果は類似しているので、磁壁における三重項クーパー対の生成を支持することはできなかった。三重項対によって強磁性金属への超伝導性の侵入距離が極めて増大すると期待されているが、スピン軌道散乱や磁壁の存在がその生成の要因になる可能性はわれわれの測定により排除された。

以上のように、超伝導体に接する膜厚 20Å の Co 内部の磁气的性質とその空間変化を Co-NMR の手段によって明らかにし、超伝導侵入によって強磁性体の磁气的性質が変化するという新たな知見を得た。結果は修正したストナーモデルを用いて定性的に説明できた。