

論文の内容の要旨

論文題目 超音波による超伝導ギャップ異方性の研究

氏名 渡辺忠孝

[背景]

ここ 20 年ほどの間に、Ce 化合物や U 化合物といった重い電子系の超伝導体、あるいは銅酸化物高温超伝導体などのような、従来とは異なる振舞いを示す超伝導体が数多く発見されてきた。これらの超伝導体は、Cooper 対が p 波や d 波といったような対称性をもつ波動関数で記述され、その超伝導ギャップ構造は k 空間のある方向にゼロギャップが存在するような異方的なギャップ構造であると考えられている。これは、Al や Pb などのような従来型超伝導体における s 波対称性の等方的なギャップ構造とは対照的である。

超伝導ギャップの異方性は、超伝導発現のメカニズムと密接な関わりがあると考えられており、これまでに比熱や NMR の緩和時間、あるいは磁場進入長といった様々なバルク物性について研究が行われてきた。異方的なギャップをもつ超伝導体では、物理量の温度依存性が等方的ギャップから期待される指数関数的な振舞いではなく、温度のべき乗に比例するような振る舞いを示すために、バルク物性の測定からギャップの異方性の有無を知ることができる。しかし、バルク物性ではフェルミ面の情報が k 空間で平均化されており、ギャップがどこでゼロになっているのか、あるいはどのような対称性をもっているのかといったことを知ることはできない。

ギャップの対称性を知るには、角度に敏感なプローブで測定を行うことが必要である。最近では、角度分解光電子分光 (ARPES) と磁場下での熱伝導率の測定が有力な測定手段となっている。特に ARPES は、銅酸化物高温超伝導体などの 2 次元電子系の研究において強力な測定手法であることが実証されている。

超音波吸収は、そのような角度に敏感なプローブの一つであり、ギャップ対称性を決定する測定手法となりうるものである。しかし、これまではその実験結果をうまく説明できるような理論モデルがほとんど提案されていなかったこともあり、実験手法として確立されているとは言い難かった。ここ数年の間に実験の解釈に適用できるような理論モデルがいくつか提案され[1-4]、超音波吸収の実験によって k 空間でのギャップ異方性の決定が可能となってきた。

[研究の目的]

本研究の目的は以下の 2 点である。すなわち、(1)新しい手法を用いた角度分解超音波吸収の測定技術の確立、および(2)その技術のホウ炭化合物超伝導体 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ への適用、である。

超伝導ギャップの対称性を決定するためには、吸収係数を高分解能で測定でき、精確な温度制御が可能な測定系が必要である。温度制御に関しては市販のクライオスタットを用いて制御することが可能である。しかし、市販の超音波装置の性能は、本研究の目的を達成するには不十分である。そこで我々は、高周波技術と自作の測定用ソフトウェアを組み合わせる

ことによって、超音波吸収測定装置を開発した。また、角度分解超音波吸収においては、測定試料として良質な大型の単結晶試料が必要となる。今回用いたフローティングゾーン法は、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ の単結晶成長に適した手法である。

本研究の2つめの目的は、開発した超音波測定技術を非磁性ホウ炭化物 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ に適用することである。 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ は、比熱の温度・磁場依存性、および非磁性不純物効果から非常に異方的な超伝導ギャップをもつ s 波超伝導体であることが示唆されている[5]。我々は、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ におけるギャップの大きさを知ることを目的として角度積分光電子分光を行った。その結果、k 空間でのギャップの大きさは、最大で 2.2 meV、最小で 0 meV であることが確認された[6]。最近の、角度回転の磁場下での熱伝導率の測定からは、[100]および[010]方向にポイントノードが存在することが主張されている[7]。本研究においては、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 単結晶について角度分解超音波吸収の測定を行い、理論モデルをもとにした考察から本測定手法の有用性について議論する。

[実験]

パルスエコー法による高分解能超音波測定装置を開発した。図 1 に、本研究において開発した装置の模式図を示す。本測定系においては、40 MHz から 120 MHz の周波数の超音波パルスを、研磨した試料表面に接着した LiNbO_3 トランスデューサによって発生させる。それにより得られるエコー列を試料の反対の面に接着した LiNbO_3 トランスデューサによって検出する。そのエコーパワーの減衰は、検波器によって検知される。本研究で用いた検波器は、エコー

図 1 : パルスエコー法を用いた超音波測定装置の模式図

間隔 (~500 ns) に対して十分早い立ち上がり時間を有するものである。検波器および増幅器の非線形性の影響は、測定系のパワー補正により除去されている。

zz 温度は PPMS (Physical Property Measurement System, Quantum Design 社) によって、2 K の低温まで精確に制御される。磁場も PPMS によって 9 T まで発生させることができる。

YNi₂B₂C の大型単結晶試料はフローティングゾーン法により育成した。X 線回折から、本単結晶が良質な単相試料であることが確認された。磁化測定から、超伝導転移温度は $T_c=15.1$ K で、転移の幅は 0.5 K 以下であった。超音波測定に用いるために、単結晶棒から試料を切り出し、それぞれの結晶軸方向の面を研磨した。研磨面の方位はラウエ反射法により決定した。

超音波吸収の温度依存性は、2-20 K の温度範囲で測定した。測定は YNi₂B₂C (正方晶) の、[100]、[110]、[001] 方向の音波を用いて、すべての独立弾性モードについて行った。測定に用いた試料の各方向の長さはそれぞれ 3.70 mm、4.60 mm、3.06 mm である。各々のモードについて、超伝導状態と、 H_{c2} より大きい磁場をかけた常伝導状態で測定を行った。

[実験結果]

図 2 は、超伝導状態 ($H=0$ T) および常伝導状態 ($H=9$ T) における、縦波の超音波吸収の温度依存性の測定結果である。L100、L110、L001 はそれぞれ [100]、[110]、[001] 方向に進む弾性モードを意味している。本結果より、本測定装置が超伝導転移に伴う変化を測定できる十分高い分解能を有していることが確認された。温度制御は 0.1 K の精度で行われ、見積もられる吸収測定の精度は 10^{-3} である。測定に際して観測されたエコー列は、40 MHz において、L100 が 2、L110 が 30、L001 が 15 であった。これは L100 モードが他の 2 つのモードに比べて大きな吸収を示していることを意味する。L110 と L001 においては、40 MHz では十分大きな吸収が得られなかったため、より高い 120 MHz で測定を行った。

図 3 は常伝導状態で規格化した 3 つのモードの吸収係数の温度依存性である。この図から顕著な異方性が見てとれる。すなわち、L110 および L001 はほぼ指数関数的な温度依存性を示しているのに対して、L100 はほぼ T のべきに比例するような振舞いを示している。このような L100 における T のべきの振舞いは、YNi₂B₂C においてノードが存在することを強

図 2 : 超伝導状態 ($H=0$ T) および常伝導状態 ($H=9$ T) における、YNi₂B₂C の縦波の超音波吸収。

く示唆するものである。

本研究では、ここに示した縦波の他に、横波についても $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ について超音波吸収の測定を行った。本論文においては、理論モデルとの比較考察から、超音波吸収のすべての測定結果から超伝導ギャップ構造の決定ができるか否かについてより詳細な議論を行う。

図 3 : 図 2 を常伝導状態で規格化した吸収の温度依存性

[参考文献]

- [1] J. Moreno and P. Coleman : Phys. Rev. B **53**, R2995 (1996).
- [2] M. J. Graf, S. K. Yip, and J. A. Sauls : Phys. Rev. B **62**, 14393 (2000).
- [3] M. J. Graf and A. V. Balatsky : Phys. Rev. B **62**, 9697 (2000).
- [4] W. C. Wu and R. Joynt : Phys. Rev. B **64**, 100507(R) (2001).
- [5] M. Nohara, M. Isshiki, F. Sakai and H. Takagi : J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 1078 (1999);
M. Nohara, H. Suzuki, N. Mangkorntong and H. Takagi : Physica (Amsterdam) **341C-348C**, 2177 (2000).
- [6] T. Yokoya, T. Kiss, T. Watanabe, S. Shin, M. Nohara, H. Takagi and T. Oguchi : Phys. Rev. Lett. **85**, 4952 (2000).
- [7] K. Izawa, K. Kamata, Y. Nakajima, Y. Matsuda, T. Watanabe, M. Nohara, H. Takagi, P. Thalmeier, and K. Maki : Phys. Rev. Lett. **89**, 137006 (2002).