修士論文要旨

# $MgB_2$ 単結晶の渦糸相図の研究

東北大学大学院理学研究科　物理学専攻
低温物質科学グループ　高橋　一真

## 背景及び目的

$MgB_2$ は金属間化合物の中では最高の超伝導転移温度 $T_c$ = 39 K を持ち、比較的高い異方性$\gamma$~ 5 を持つことから、高温超伝導体で観測されるような混合状態での渦糸系相転移（order-disorder 転移、渦糸格子融解転移）や層状構造に由来した固有ピニング現象が存在することが期待されている。これまでに $MgB_2$ の低温での磁化曲線において磁化のヒステリシスが増大するピーク効果が観測されており、order-disorder 転移という 1 次相転移に伴うものであると予想されている。しかし、本当に 1 次相転移が存在するという直接的な証拠（磁化等の熱力学量の不連続変化）はまだない。渦糸格子融解転移や固有ピニングの存在についてはほとんど報告がなく、これらについても明らかにする必要がある。

そこで本研究では、

①order-disorder 転移の検証および渦糸格子融解転移の存在の有無を明らかにすることで $MgB_2$ の渦糸相図を決定する。特に order-disorder 転移が 1 次相転移であることの直接的な現象を観測する

②相転移磁場の角度（磁場方向）依存性やそこでの磁化の熱力学的考察から各相転移の起源を明らかにする

③磁化ヒステリシス（∝ 臨界電流密度 $J_c$）の角度依存性から固有ピニングの存在について明らかにする

ことを目的とし、磁気トルク法を用いて $MgB_2$ 単結晶の磁化特性を詳細に調べた。

## 実験方法

測定に用いた試料は高圧法によって作成された純良 $MgB_2$ 単結晶（超伝導転移温度 $T_c$ = 37 K）である。図 1 に示すような AFM 用のカンチレバーを用いた磁気トルク測定法により磁化測定を行った。これは磁場に対して試料の $c$ 軸を角度$\theta$だけ変化させた時に発生するトルク$\tau$をカンチレバーについたピエゾ抵抗から測定する方法である。$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H}$ の関係により磁化 $M$（∝ $\tau/H$）の磁場依存性の詳細な測定を行った。

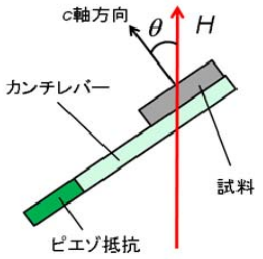


図 1 トルク測定原理図

## 実験結果及び考察

・$MgB_2$ における渦糸系相転移の観測

典型例としてトルク測定によって得られた$\theta = 60^\circ$における各温度 $T$ での$\tau(H)$曲線を図 2 に示す（他の$\theta$においても同様な結果が得られている）。全体的にヒステリシスはあまり大きくなく、測定した試料が純良であることがわかる。▲は上部臨界磁場 $H_{c2}$ である。25 K 以下の低温、高磁場側でピーク効果を観測した。図 3 の $M(H)$の拡大図に示すように磁化$\tau/H$ の傾きが最大となる磁場を order-disorder 転移磁場 $H^*$と定義した（図中▽）。$H^*$は 1 次相転移点であることが予想されているが、相転移現象がヒステリシスに隠れて見えない。そこで磁束 shaking 法を用いてピーク効果領域で緩和磁化測定を行った。これは直流磁場中で微小な交流磁場$\Delta H_{AC}$を印加することで渦糸を”揺さぶり”、ピン止めによるヒステリシスを緩和させながら磁化を測定する方法である。その結果、ほとんど熱平衡の $M(H)$が観測され、$H^*$近傍で明瞭な磁化のステップを観測した（図 4）。これは 1 次相転移であることの直接的な証明となる。

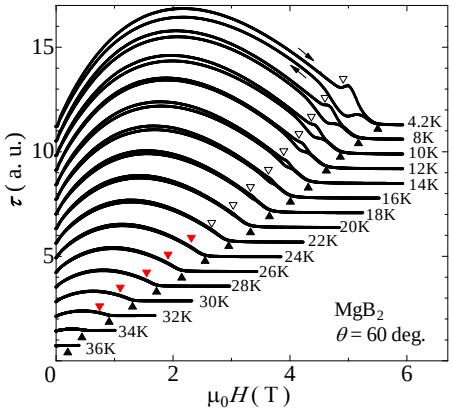


図 2 $\theta = 60^\circ$、$T = 4.2$ - 36 K における $\tau$-$H$ 曲線

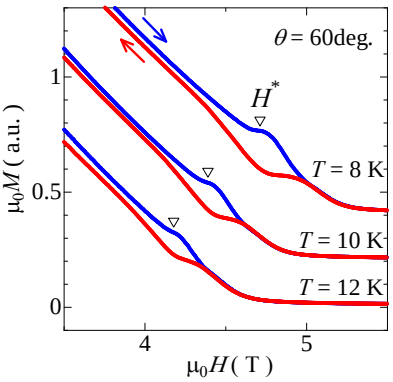


図 3 $M(H)$のピーク効果付近の拡大図

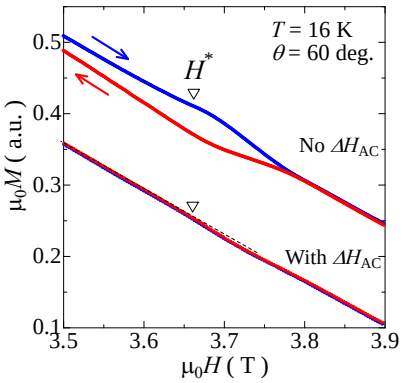


図 4 緩和磁化測定で得られた $M(H)$曲線の比較

一方、26 K の高温側においてピーク効果は観測されなくなり、$\tau(H)$に小さなステップが観測されるようになる。この位置を $H_m$ と定義し図 2 に▼で示した。このステップの存在は微分磁化にプロットし直すとピークとして現れ、より明瞭になる（図 5)。高温超伝導体との類似点よりこれは渦糸格子融解に伴う 1 次相転移であると考えられる。以上のことから $MgB_2$ には 2 種類の 1 次相転移が存在することがわかった。

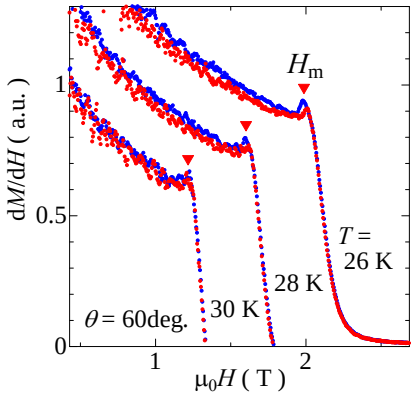


図 5 $\theta = 60^\circ$における d$M$/d$H$-$H$ 曲線

・相転移磁場の角度依存性

図 6(a)(b)に $T$ = 4.2 K、27 K における $H^*$および $H_m$ の角度依存性を $H_{c2}$ とともに示す。図中の曲線は GL 有効質量モデルによるフィッティングであり、それぞれ同じ異方性パラメータ$\gamma$で良くフィットできる。この $H_m$ の角度依存性の結果は渦糸格子融解が熱揺らぎによって起こるという理論と矛盾しない。また、$H^*$も同様の式を用いて表わされることから order-disorder 転移が熱揺らぎを起源とする可能性が考えられる。一方、order-disorder 転移が超伝導体中の disorder を起源とするならば等方的なピニングによって引き起こされるものであるとも解釈できる。

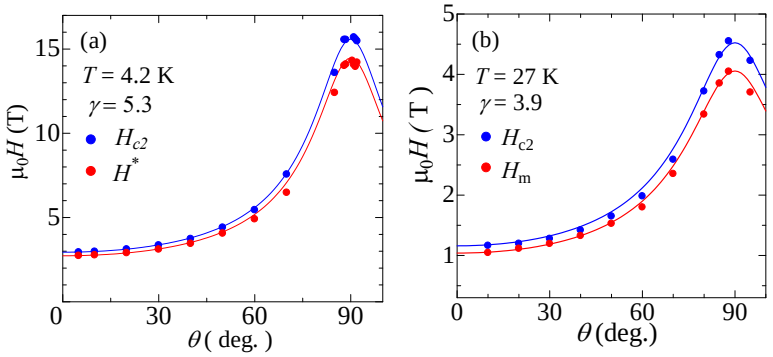


図 6 (a)$H^*$ と (b)$H_m$ の角度依存性

・固有ピニングの存在

固有ピニングの存在を調べるために磁化のヒステリシス$\Delta M$ の角度依存性を測定した（図 7)。$\theta$ = 90°近傍においてヒステリシスが急激に増大していることがわかる。これは $ab$ 面に平行な磁場方向において強いピン止めが存在することから、固有ピニングの存在を意味するものである。

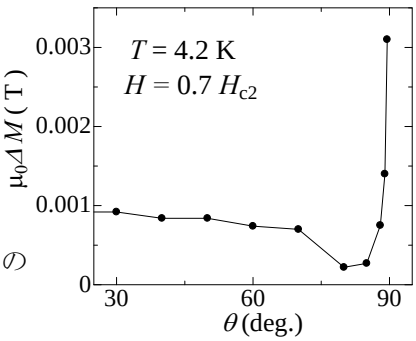


図 7　ヒステリシス$\Delta M$ の角度依存性