

層状超伝導に於ける渦糸場の理論

日本電子専門学校 米田 守重

東京電機大学・工 丹羽 雅昭、篠原 正三

1、はじめに

酸化物高温超伝導体はその発見以来、多くの研究者によって、実験的、理論的研究の蓄積が成されてきたが、現在のところどの研究者にも確実に認められている特徴は、だいたい次の三つに限られるであろう。1) T_c が高い。2) CuO_2 面が面間方向に弱く結合した層状構造をしている。3) 著しく強い第二種超伝導体的性質を示している。この中で、2)の性質に関しては、磁束のパンケーキ状態をはじめとした、従来の超伝導体と比べ、特異な渦糸状態の存在可能性が数多く報告されている。3)の性質についてはフラストレーションが非常に強い系であることを示している。酸化物超伝導体の現象論的モデルを考える場合、少なくとも、これら三つの性質をすべて考慮する必要がある。

一方、二次元量子ジェセフソン接合系については、 $T=0$ に於ける超伝導-絶縁体転移に関して数多くの報告がある。これは $T=0$ 近傍に於いて助長される量子的揺らぎから、位相的欠陥である量子渦が生成されることにより超伝導秩序が破壊される現象である。これはクーパー対と渦との間のdualityという観点からも、興味を持たれている現象である。我々は酸化物超伝導体などの、異方性が非常に強い層状超伝導体の渦糸状態に対して新しい解釈を与えるため、二次元量子ジェセフソン接合系に於ける超伝導-絶縁体転移とのアナロジーから、クーパー対と渦糸とのdualityという概念を用い、新しい解釈を与えた。さらに我々は、このduality変換により渦糸表現を導出し、このモデルの低温展開から熱力学的諸量を計算した。

2、モデル

我々は以下に示すような、格子層状超伝導モデルの分配関数を導入した。

$$Z_{LLS}(\beta_1, \beta_2, q) = \prod_{x=1}^N \prod_{a=1}^M \left[\int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\theta(x, a)}{2\pi} \right] \prod_{x=1}^N \left[\prod_{j=1}^3 \int_{-\infty}^{\infty} dA_j(x) \right] \Phi(\mathbf{A}) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_x \sum_{j=1}^3 \left[\tilde{\nabla} \times \mathbf{A} \right]_j^2 \right\} \\ \times \exp \left\{ \beta_1 \sum_x \sum_{j=1}^D \cos[\nabla_j \theta(x) - q A_j(x)] + \beta_2 \sum_x \cos[\nabla_z \theta(x) - q A_z(x)] \right\},$$

$$\beta_1 \equiv \beta\sigma, \beta_2 \equiv \beta g, \tilde{\nabla}_j = \nabla_j (j=1, 2), \tilde{\nabla}_3 = \sqrt{\frac{g}{\sigma}} \nabla_z, q \equiv 2\pi/\Phi_0 = 2\pi 2e/\hbar c = 2e/\hbar c,$$

$$\text{elementary flux quantum, } \Phi_0 \equiv \hbar c/2e = 2 \times 10^{-15} \text{ Wb}, \sigma \equiv \frac{\hbar}{2e} I_1, g \equiv \frac{\hbar}{2e} I_2. \quad (1.1)$$

ここで I_1, I_2 はそれぞれ $x-y$ 平面と z 方向の臨界電流である。また $A_j(x)$ は現実の電磁ポテンシャルと考えてもよいが、ここではサイトのフラストレーションを引き起こす場と考える。従って、このモデルでは、それぞれ $x-y$ 平面と z 方向の結合定数 σ, g から作られ

る2つの温度 $\beta_1 \equiv \beta\sigma$, $\beta_2 \equiv \beta g$ とサイトフラストレーションの強さを表す電荷 q の3つをパラメータと考える。

3、低温展開による熱力学的諸量の異方性パラメータ $X \equiv g/\sigma$ とサイトフラストレーションのパラメータ m 依存性

(1.1)式のduality変換により渦糸表現を導出し、この低温展開から熱力学的諸量を計算した結果を次のグラフに示す。 $X \equiv g/\sigma$ は x y 平面と z 方向の異方性の強さを表す異方性パラメータであり、 $1 \gg X \equiv 0$ のときは異方性が非常に強く、二次元的性質を帯びてくるため、ここでは渦糸間のポテンシャルを二次元の対数型ポテンシャルからの摂動で表し、計算した。また m はサイトフラストレーションのパラメータであり、実際には低温極限で $m \propto q \sqrt{g\beta}$ となる。

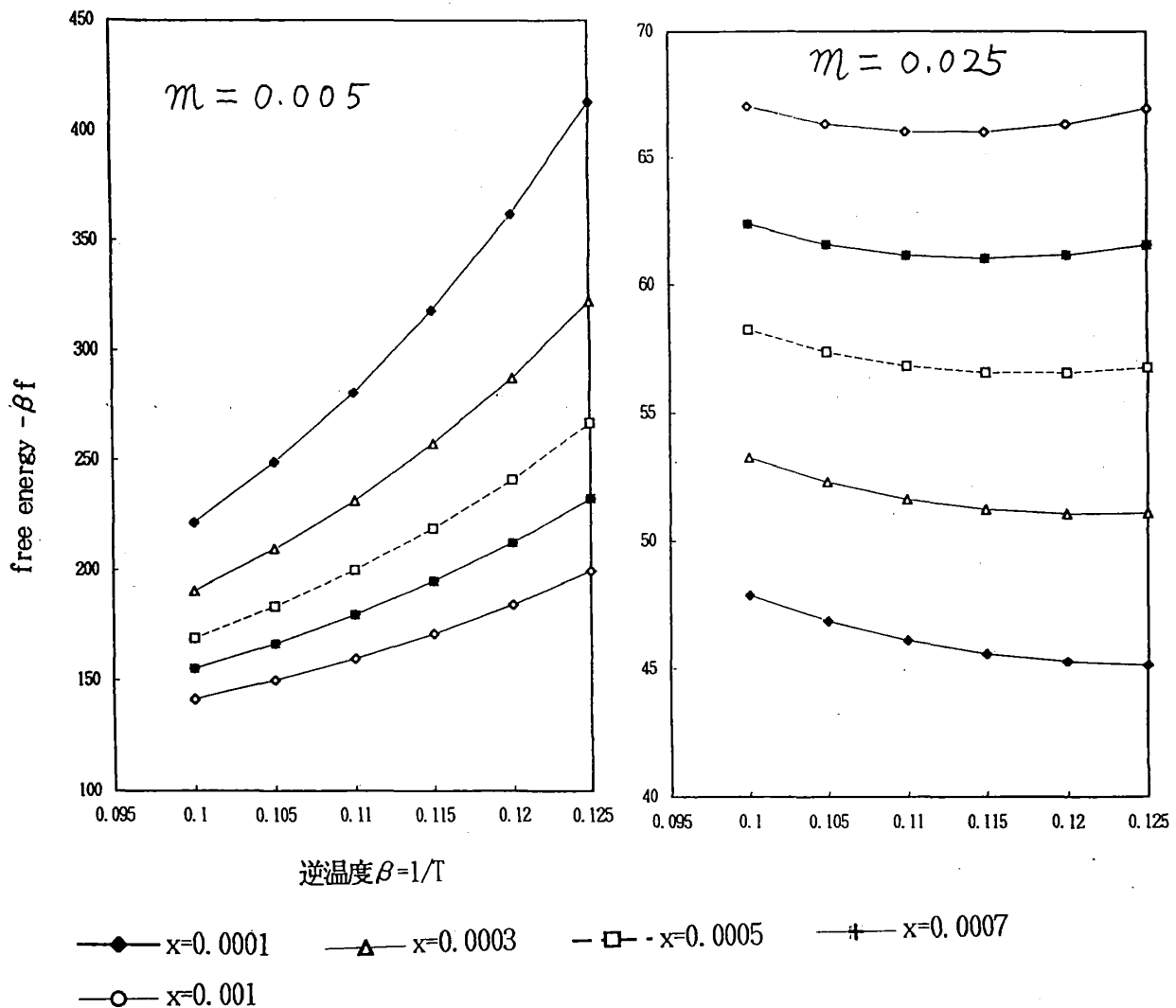


図1、低温展開(対数型ポテンシャル)による $-\beta f$ の β 依存性

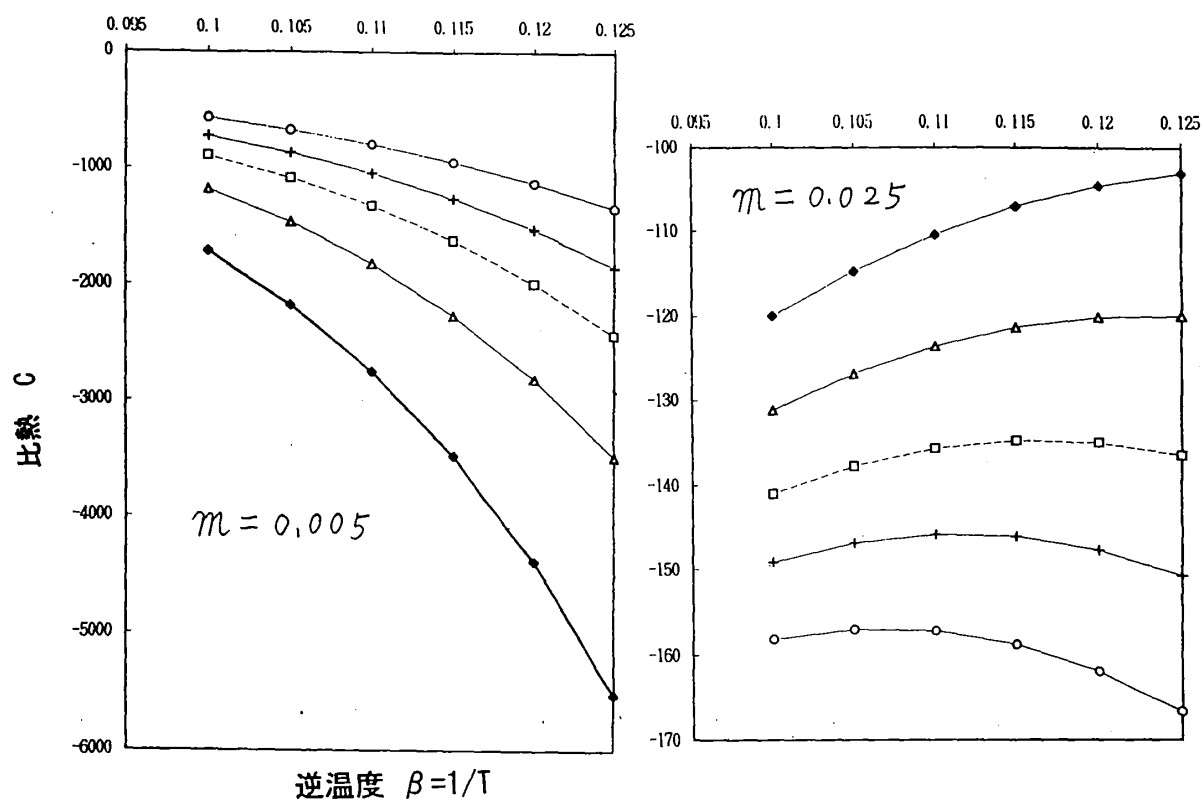


図 2、低温展開(対数型ポテンシャル)による比熱 C の β 依存性

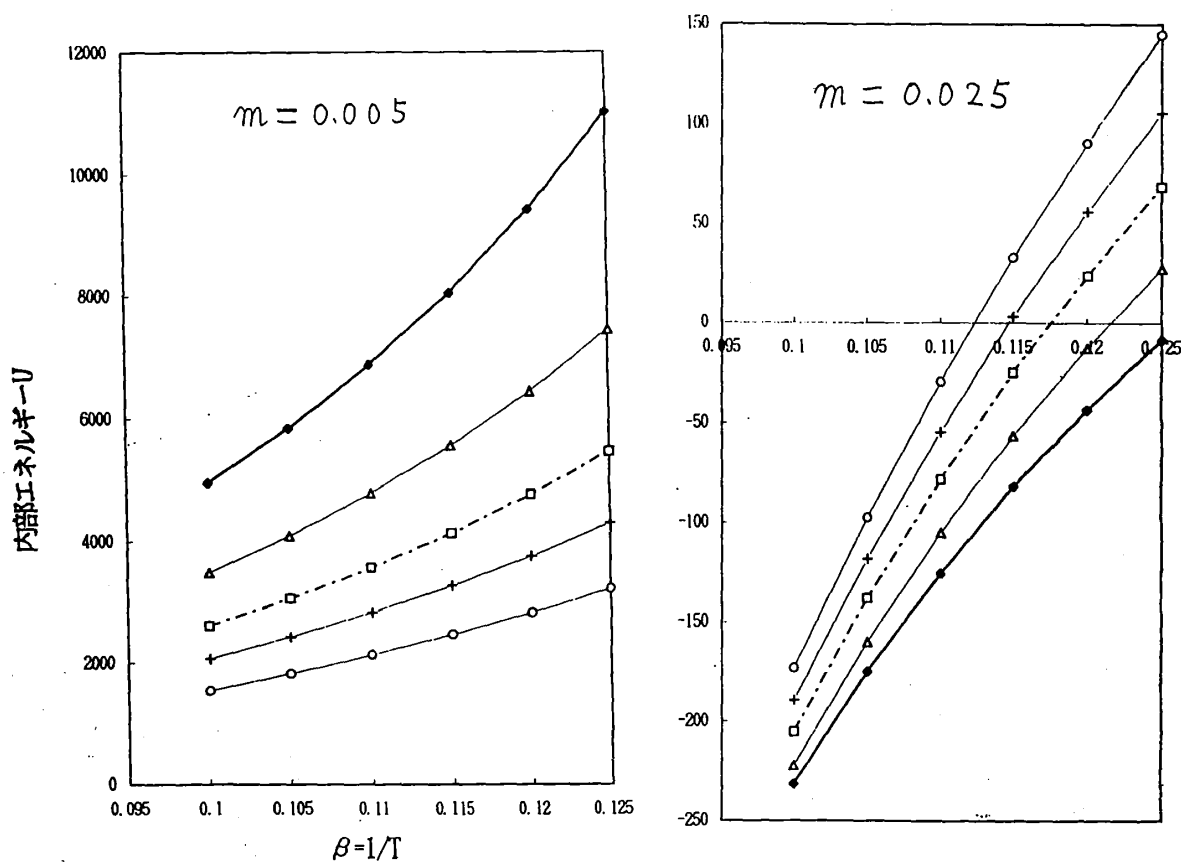


図 3、低温展開(対数型ポテンシャル)による内部エネルギー U の β 依存性

図1、図2、図3にそれぞれfree energy、内部energy、比熱を示したが、サイトフラストレーションのパラメータ $m=0.005$ と $m=0.025$ の場合ではそれぞれ異方性パラメーターの違いによる逆温度 $\beta=1/T$ 依存性に値の逆転が起こっている。このように異方性が非常に強い系では、サイトフラストレーションの強さの微妙な変化に従って、これらの熱力学的諸量の温度特性を非常に大きく変えることが解る。

3、まとめ

フラストレーションのある層状超伝導モデルに双対変換を用いることにより渦糸表現を導出し、低温展開から熱力学的諸量を計算し、その異方性パラメーター依存性、mass (m) 依存性について求めた。