

## 超伝導体内で消失・生成したエネルギーについての考察

### Consideration on Disappeared or Appeared Energy in Superconductors

九工大情工 ○松下 照男, 木内 勝

Kyushu Inst. Technol., ○Teruo Matsushita, Masaru Kiuchi

E-mail: matsushita.teruo391@mail.kyutech.jp

#### はじめに

外部磁界などを変化させたときに超伝導体内部の磁束構造が変わり、このときに超伝導体に流入するエネルギー  $U$  は Poynting ベクトルを用いて求めることができる。このとき、超伝導体に侵入した  $U$  の値は内部の磁気エネルギーの変化  $U_m$  と異なり、エネルギーの一部が消滅したり、新しく生成されたかのように見える。こうした現象について一般的な考察を行う。

#### 理論的考察

臨界状態モデルに従う多くの場合、超伝導体に加える外部磁界を増加したときの  $U$  の値は  $U_m$  よりも小さく、一部のエネルギーが消滅している。このエネルギーは実際にピンニング損失として消費されており、消失していても問題ではない。

しかしながら、多くの実験で観測されている磁束線の可逆運動領域ではエネルギーはほとんど消費されることがなく、エネルギー保存が満たされないかのような印象を与える。とくに以下に取り扱う、超伝導平板 ( $0 \leq x \leq 2d$ ) に平行 ( $z$  方向) に加えた磁界を  $H_m$  まで増加させた後、わずかに  $\Delta H_e$  だけ減少させた場合など、それとは全く異なることが起こる。この場合の磁束分布を Fig. 1 に示す。そのときの磁束分布は

$$B_z(x) = \mu_0 (H_m - J_c x - \Delta H_e e^{-x/\lambda_0'})$$

で与えられる。ここで、 $J_c$  は臨界電流密度、 $\lambda_0'$  は Campbell の交流磁界の侵入深さである。磁界を  $H_m$  から  $H_m - \Delta H_e$  まで変化させたときに超伝導体外に入るエネルギーは、超伝導体表面の単位面積当たり

$$U = -\mu_0 \lambda_0' \Delta H_e (H_m - \Delta H_e / 2)$$

となる。ただし、 $d \gg \lambda_0'$  とした。一方、超伝導体内の磁気エネルギーの変化は

$$U_m = -\mu_0 \lambda_0' \Delta H_e (H_m - J_c \lambda_0' - \Delta H_e / 4)$$

となり、 $|U| > |U_m|$  である。すなわち、磁気エネルギーの減少分を超えるエネルギーが超伝導体の外に出ていることを意味する。この余分なエネルギーはどこから出てきたのであろうか。

Poynting ベクトルには磁気エネルギー以外にも力学的仕事  $\int \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dx$  が含まれることに注意されたい。以上の場合もこの違いは Lorentz 力による仕事となっており、実際に計算で確かめることができる。しかしながら、この新しく出てきたエネルギーはどこにあったのであろうか。今の場合、仕事は負である。それはピンニング・エネルギー  $U_p$  として蓄えていたものが吐き出されたことを意味する。実際に  $U_p$  の変化も同じ結果を導く。

#### 結論

横磁界下において取り扱うエネルギーは

$$\mathcal{G} = U_m + U_p - (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{u}$$

であり、 $\mathbf{u}$  は磁束線の変位である。これを  $\mathbf{u}$  に関して最小化し、力の釣り合いの式が得られ、また上の問題点が説明される。

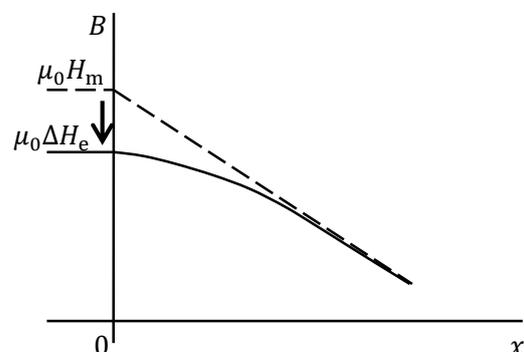


Fig. 1. Change in the magnetic flux distribution in the superconductor.