

# 超伝導体の繊維化および磁気特性とセンサ特性の研究

小西 哉

信州大学 繊維学部 機能機械学科

## 1. 序論

高温超伝導体の磁場応答を評価するためには、超伝導体内のピンにトラップされた磁束線の動力学を解明する必要がある。本年度は、超伝導体中の磁束線の挙動を **Dragged Spring Model** と呼ぶ機械モデルで表現し、超伝導体の磁気的な応答を解析した。

## 2. 実験

実験装置を Fig.1 に示す。熔融 YBCO 超伝導体(直径 17mm×厚さ 6.5mm)上 5mm に Nd-Fe-B 磁石(直径 22mm×厚さ 10mm, 磁化 1.1T)を固定し、超伝導体を磁場中冷却した。カムを用いて振幅 2mm<sub>p-p</sub>, 周波数 1~50Hz の正弦波で超伝導体を往復運動させた。超伝導体の変位をレーザ変位計で測定し、磁石にはたらく磁気力をフォースゲージで測定した。10Hz における磁気力を Fig.2 に示す。超伝導体が磁石から遠ざかる方向の変位を正とした。超伝導体が磁石から遠ざかる時磁石には吸引力がはたらき、超伝導体が磁石に近づくとき磁石には反発力がはたらいた。磁気力は反発力を正とした。磁気力の波形には、ピン止め効果による歪みが確認できた。

磁気力は磁石の変位に対してヒステリシスを描く。このヒステリシスで囲まれた面積が超伝導体内で発生する 1 周期あたりの磁気損失となる。この磁気損失の周波数特性を Fig.4 に示す。1 周期

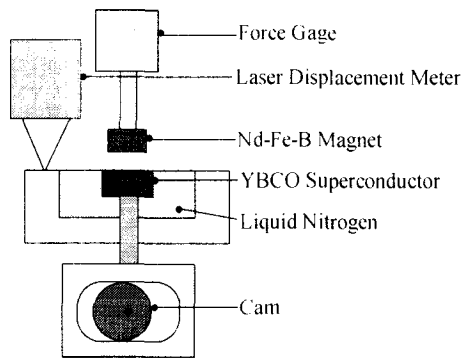


Fig.1 Schematic of the experimental arrangement

あたりの磁気損失は周波数が高くなるにつれてほぼ単調に減少した。

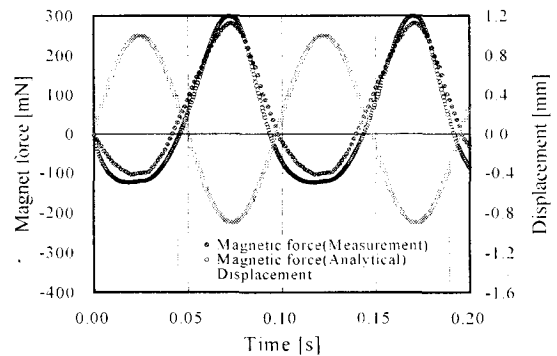


Fig.2 Waveforms of magnetic force and displacement of the superconductor (10Hz).

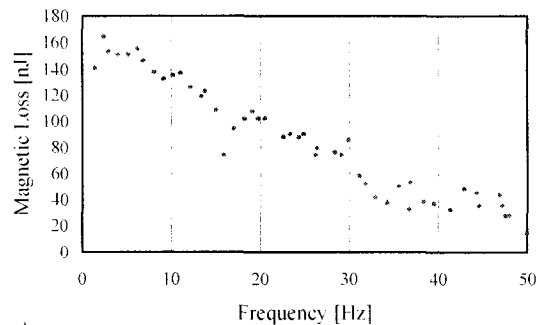


Fig.3 Frequency dependence of magnetic loss per cycle.

## 3. 解析

超伝導体内に発生する磁気力の解析には、おもりを引きずりながら移動するばねでピン止め磁束線をモデル化した非線形機械モデルである **Dragged Spring Model**<sup>(1)</sup> (Fig.4)を用いた。外力  $F$  が摩擦力  $F_{\text{fric}}$  を超えない場合、ばねは A 点に引き戻されるような力を受ける。これはピン止めされている磁束線がピンに引き戻されることに相当する。外力  $F$  が摩擦力  $F_{\text{fric}}$  を超えた場合、おもりは引きずられ A 点から B 点に移動する。そして、ばねは B 点に引き戻されるような力を受ける。これはピン止めされていた磁束線がピンから外れ、新たなピンにピン止めされる状態に相当する。こ

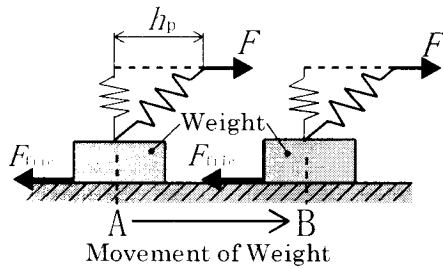


Fig.4 Dragged spring model.

のとき磁気力は式(1)で表される<sup>(1~3)</sup>.

$$F = (a_1 e^{-a_2 x})x + k_p(x - x_p) \quad (1)$$

ここで、 $x_p$ は磁束線がピン止めされている現在位置、 $k_p$ はピン止めされている磁束線の数である。ばねの伸び  $x - x_p$ は、 $|x - x_p| \leq h_p$ とする。 $h_p$ は各ばねが最大伸び得る長さであり、ピンのピン止め力に相当する。式(1)の第1項はマイスナー力、第2項はピン止め力を表すことになる。

超伝導体が磁石に近づくとき、超伝導体を貫く磁束線の数が増加するため、ピン止めされている磁束線の数  $k_p$ が増加すると考えられる。そこで、ピン止めされている磁束線数は式(2)のように変位  $x$ に対して指数関数的な依存性を示すと考えられる<sup>(2~4)</sup>.

$$a_3 e^{-a_4 x} \quad (2)$$

また、超伝導体には様々なピン止め力を持ったピンが存在しているので、磁束線をピン止めしているピンの数は式(3)のようにピン止め力  $h_p$ の指数関数で表すことができる<sup>(5)</sup>.

$$b_1 e^{-b_2 h_p} \quad (3)$$

実験結果(Fig.3)より、周波数が高くなるにつれて、1周期当たりの磁気損失は減少した。このことから、変位速度が大きくなるにつれて、ピン止めされている磁束線の数が増加すると考えられる。そこで、式(3)の定数  $b_1$ を式(4)のように超伝導体の変位速度  $v$ の指数関数として表した。

$$b_1 = c_1 e^{-c_2 v} \quad (4)$$

また、変位速度が大きくなるほどピン止め力  $h_p$ の小さなピンにピン止めされている磁束線のほうが、 $h_p$ の大きなピンにピン止めされている磁束線よりも減少の割合が大きくなるように、式(3)の定数  $b_2$ を変位速度  $v$ の指数関数として、最終的に  $k_p$ を式(5)のように表した。

$$k_p = a_3 e^{-a_4 x} c_1 e^{-c_2 v} e^{-(a_1 e^{-a_2 x}) h_p} \quad (5)$$

式(5)を式(1)に代入して得た磁気力の解析結果を Fig.5 に示す。計算値は実験波形にほぼ一致した。Fig.6 に示すように、1周期当たりの磁気損失の解析結果も、実験値とほぼ一致している。

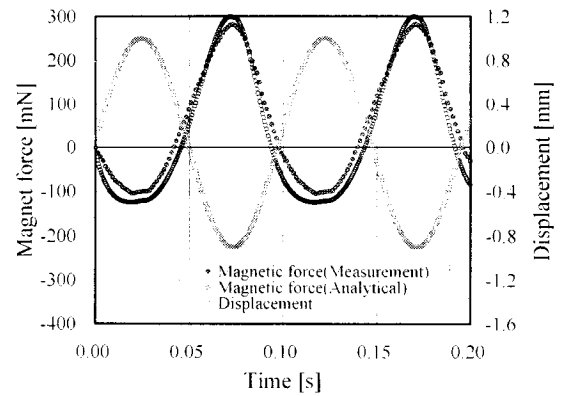


Fig.5 Calculated result of magnetic force (10Hz).

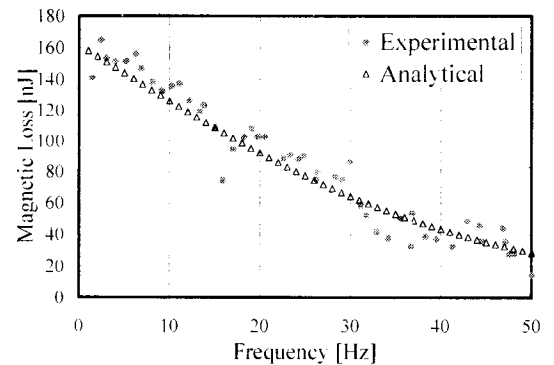


Fig.6 Frequency dependence of magnetic loss per cycle.

#### 4. 結論

超伝導体と磁石間にはたらく磁気力を Dragged Spring Model を用いて解析した。ピン止め磁束線の数  $k_p$  に速度依存性を付加することにより、超伝導体内で発生する磁気損失の周波数特性を説明することができた。

謝辞: レーザ変位計の使用の機会を与えてくださった日置電機(株)の関係者の方々に感謝申しあげる。

#### 【参考文献】

- (1) M. Futamura, T. Maeda, and H. Konishi : Jpn. J. Appl. Phys., **37**, 3961-3964(1998).
- (2) 前田 武, 二村 宗男, 小西 哉: 第10回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 227-230(1998).
- (3) 前田 武, 二村 宗男, 小西 哉: 第11回信州地区計測制御研究講演会講演論文集, 32-35(1998).
- (4) T. Maeda, M. Futamura, and H. Konishi : Jpn. J. Appl. Phys., to be published in March (1999).
- (5) 田澤 朋裕, 須賀 政晴, 渡辺 尚也, 小西 哉: 第12回信州地区計測制御研究講演会講演論文集, 53-56(1998).