

鞍型ピックアップコイルによる交流損失測定における幾何学的相対配置に伴う磁化検出率の理論的評価

福田, 祐三

九州大学大学院システム情報科学府電気電子システム工学専攻 : 博士後期課程

福井, 正道

九州大学大学院システム情報科学府電気電子システム工学専攻 : 修士課程

柁川, 一弘

九州大学大学院システム情報科学研究院超伝導科学部門

岩熊, 成卓

九州大学大学院システム情報科学研究院超伝導科学部門

他

<https://doi.org/10.15017/1515838>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 8 (1), pp.77-83, 2003-03-26. 九州大学大学院システム情報科学研究院

バージョン :

権利関係 :

鞍型ピックアップコイルによる交流損失測定における 幾何学的相対配置に伴う磁化検出率の理論的評価

福田祐三*・福井正道**・柁川一弘***・岩熊成卓***・船木和夫***

Theoretical Evaluation of the Detection Ratio of the Magnetization Due to the Geometrical Configurations on AC Loss Measurement with a Saddle-Shaped Pickup Coil

Yuzo FUKUDA, Masamiti FUKUI, Kazuhiro KAJIKAWA,
Masataka IWAKUMA and Kazuo FUNAKI

(Received December 12, 2002)

Abstract: We theoretically investigated adequate geometrical configuration of a saddle-shaped pickup coil for accurate measurement of the AC losses in oxide superconducting taped wires with large anisotropy. Defining the ratio of the apparent signal due to the magnetic moment in sample wires, which is detected by a saddle-shaped pickup coil, to the actual one as a detection ratio, we calculated the dependences of the detection ratio on the height, width and length of the straight and opening parts of a saddle-shaped pickup coil. We found out that it is possible to obtain the actual magnetization without compensation by supposing that the effective length of sample wires is equal to that of the straight part of a saddle-shaped pickup coil. Here we should consider that the signal detected by the opening part compensates for the shortage of the signal detected by straight part. Finally the recommendable dimensions of the saddle-shaped pickup coil were given for the measurement of the AC losses in currently developed oxide superconducting wires.

Keywords: AC loss measurement, Pickup coil method, Saddle-shaped pickup coil, Oxide Superconducting tape, Anisotropic AC loss property, Detection ratio of the magnetization

1. はじめに

我々は、異方性を持つ酸化物超伝導線材の交流損失測定法として鞍型ピックアップコイルを提案している。^{1,2)} 鞍型ピックアップコイルは形状が複雑であり、これを用いた交流損失測定はピックアップコイルと試料との幾何学的相対配置に起因する測定誤差を内包する。この測定誤差は試料の磁化に対するピックアップコイルによる検出率として計算することができる。

本論文では、鞍型ピックアップコイルにおける磁化検出率の形状、寸法及び試料との相対配置依存性を理論的に算出し、その結果について検討した。

2. 円断面試料の磁化の有効検出率

解析の上で、鞍型ピックアップコイルを2つの部分に分けて考えた。両端部分における巻線が上下に開いている部分を開口部とし、中央部分を直線部とした。鞍型ピックアップコイルの外観及び各部の寸法を Fig. 1 に示す。

ピックアップコイル幅方向を X 軸、高さ方向を Y 軸、長手方向を Z 軸とした。ピックアップコイルの寸法は、ピックアップコイルの幅を $2D$ 、高さを $2H$ 、直線部の長さを $2L_1$ 、開口部の長さを片側で L_2 (両側あわせて $2L_2$)、ピックアップコイル端部における開口幅を $2H_0$ とした。また、開口部における X-Z 平面からコイル中心までの距離を H_c とした。ピックアップコイル巻線の厚みは無視した。

2.1 鞍型ピックアップコイルの鎖交磁束

Fig. 1 (b), (c) に示すように試料線材の中心軸上に一様に単位長さ当たり m の磁気モーメントが存在するとして、これによる鎖交磁束を計算する。この場合、磁気モーメント m により与えられるベクトルポテンシャル A は Z 成分のみであり

$$A_z = \frac{\mu_0 m}{2\pi} \cdot \frac{X}{X^2 + Y^2} \quad (1)$$

である。Y 方向微小間隔 ΔY に鎖交する磁束 $\Delta\Phi$ は Z 方向単位長さ当たり

$$\Delta\Phi = (A_z(D, Y) - A_z(-D, Y)) \cdot n_p D \cdot \Delta Y \quad (2)$$

平成14年12月12日受付

* 電気電子システム工学専攻博士後期課程

** 電気電子システム工学専攻修士課程

*** 超伝導科学部門

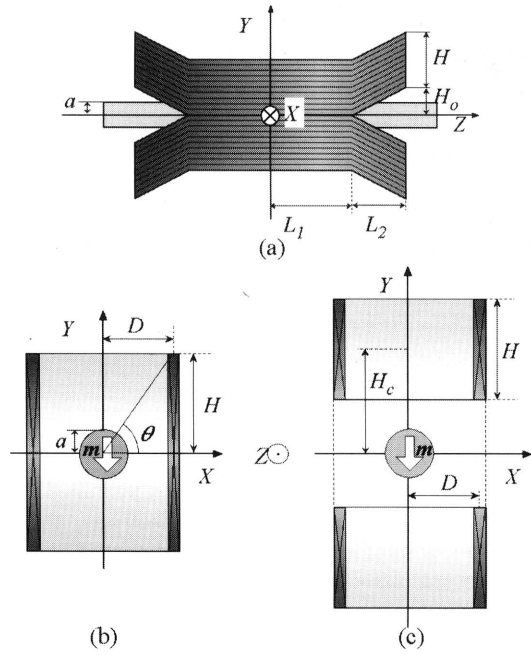


Fig. 1 Schematic view of the saddle-shaped pickup coil and a wire in the center of the pickup coil

と与えられる. ここで n_p はピックアップコイルの Y 方向単位長さ当たりの巻数である. これより $\Delta\Phi$ は次式となる.

$$\Delta\Phi = \frac{\mu_0 n_p m}{\pi} \cdot \frac{D}{Y^2 + D^2} \cdot \Delta Y \quad (3)$$

よって, ピックアップコイル直線部に Z 方向単位長さ当たりに鎖交する磁束 Φ は(3)式を $-H$ から H まで積分して

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\mu_0 n_p m}{\pi} \int_{-H}^H \frac{D}{Y^2 + D^2} dy \\ &= \frac{2\mu_0 n_p m}{\pi} \arctan \frac{H}{D} \end{aligned} \quad (4)$$

となる. 無限長のピックアップコイルに Z 方向単位長さ当たりに鎖交する磁束 Φ_T とすると, (4)式において $H \rightarrow \infty$ とすることにより与えられ

$$\begin{aligned} \Phi_T &= \lim_{H \rightarrow \infty} \Phi \\ &= \mu_0 n_p m \end{aligned} \quad (5)$$

となる. よって, ピックアップコイルに鎖交する試料磁化による磁束の割合, 即ち磁化検出率 g は

$$g = \frac{\Phi}{\Phi_T} \quad (6)$$

で与えられることになる. 鞍型ピックアップコイル直線部における磁化の検出率を g_1 とすると

$$g_1 = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{H}{D} \quad (7)$$

と与えられる. ここで, $\arctan(H/D)$ は Fig. 1 (b) における試料線材がピックアップコイルを見込む角度 θ であり, g_1 は 2θ の π に対する比である.

ここで X, Y 座標軸をピックアップコイルの幅の半分 D で規格化し

$$\begin{cases} x = \frac{X}{D} \\ y = \frac{Y}{D} \end{cases} \quad (8)$$

として $x-y$ 座標系に置き換える. コイル長さはコイルの幅や高さから独立して選定しうるパラメータであるので, Z 軸は開口部の長さ L_2 により規格化する.

$$z = \frac{Z}{L_2} \quad (9)$$

Fig. 2 に規格化した座標系における鞍型ピックアップコイルの各寸法を示す. $h = H/D$ とすると(7)式は

$$g_1 = \frac{2}{\pi} \arctan h \quad (10)$$

と書き替えることができる. 今後の議論は規格化した座標系で行うことにする.

次に, 両端の開口部での検出率を求める. (1)式におけるベクトルポテンシャルの z 方向成分は規格化した座標系においては次式で与えられる.

$$A_z = \frac{\mu_0 m}{2\pi} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} \quad (11)$$

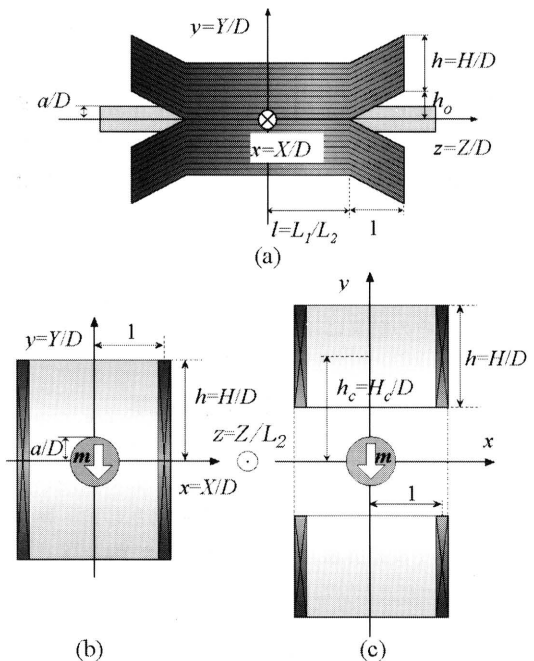


Fig. 2 Schematic view of the saddle-shaped pickup coil in case of normalized axis

開口部における鎖交磁束は直線部と同様に考えて、

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{\mu_0 n_p m}{\pi} \left(\int_{-h_c-h/2}^{-h_c+h/2} \frac{1}{y^2+1} dy + \int_{h_c-h/2}^{h_c+h/2} \frac{1}{y^2+1} dy \right) \\ &= \frac{2\mu_0 n_p m}{\pi} (\arctan(h_c+h/2) - \arctan(h_c-h/2)) \quad (12)\end{aligned}$$

と求めることができる。ここで h_c は x 軸からコイルの中心までの距離を r としたときに $l < z < l+1$ の領域において

$$h_c = r/D = \frac{h}{2} + h_0(z-l) \quad (13)$$

で与えられる。ただし $h_0 = H_0/D$ である。よって、直線部と同様に開口部における磁化の検出率 g_2 を求めると

$$g_2 = \frac{2}{\pi} (\arctan(h_c+h/2) - \arctan(h_c-h/2)) \quad (14)$$

となる。

2.2 磁化検出率の定義

ピックアップコイル全体での磁化検出率 G は次式で与えられる。

$$G = \frac{1}{l+1} \left(\int_0^l g_1 dz + \int_l^{l+1} g_2 dz \right) \quad (15)$$

この結果から、 G は g_1 、 g_2 と同様に鞍型ピックアップコイルの寸法 h 、 h_0 、 l により決まることがわかる。 h をパラメータに G の l 依存性を Fig. 3 に示す。この図において $h_0=1$ とした。この G の値は交流損失測定上の補正係数となる。しかし、 G のとる値は 0.4 ~ 0.8 程度であり、測定結果と交流損失の真値が一致する $G=1$ とならない。このため、測定の度に補正が必要となり非常に不便である。そこで G を直線部と開口部に分解しそれぞれの寄与を

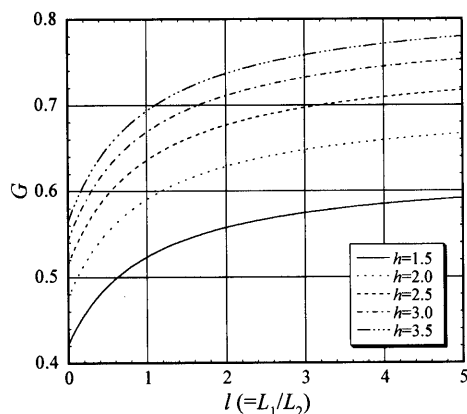


Fig. 3 l dependence of the detection ratio, G

$$\begin{cases} G_{L1} = \frac{1}{l+1} \int_0^l g_1 dz \\ G_{L2} = \frac{1}{l+1} \int_0^{l+1} g_2 dz \end{cases} \quad (16)$$

と定義して Fig. 4 に l 依存性を示している。 l が大きくなると G_{L2} に対して G_{L1} が大きくなり G のうちの大半は直線部によるものであることがわかる。また、 l が大きくなるに従い G 、 G_{L1} ともに大きくなり 1 に近づいていくが、 l の増加に対して G の 1 への漸近は極めて鈍い。開口部が存在せず直線部のみの場合、つまり矩形のピックアップコイルにおいては $G = g_1$ と考えることができる。この場合において 1% 以内の誤差で G を与えようとするを得られる h は $h=63.7$ となる。しかし、実際に鞍型ピックアップコイルを作成することを考えると、 h の現実的な値は 2 ~ 4 程度であるため、 $G=1$ となるような鞍型ピックアップコイルを作成することは不可能である。 G を計算する上ではピックアップコイル内の試料体積を考慮しているためピックアップコイル長で平均化しているが、補正なく測定ができる利便性を得るために磁化検出率の定義をし直す方がよい。そこで、磁化を検出する試料の体積を直線部のみによるものとして新たに G' として

$$G' = \frac{1}{l} \left(\int_0^l g_1 dz + \int_0^{l+1} g_2 dz \right) \quad (17)$$

と磁化の検出率を定義し直す。新たに定義した G' の l 依存性を h をパラメータとして Fig. 5(a) に、 h_0 をパラメータとして Fig. 5(b) に示す。この図より G' を定義することにより磁化検出率は 1 を取りうるものになることがわかる。そのときの l 、 h 、 h_0 を用いて鞍型ピックアップコイルの寸法を設計しておくことにより、交流損失を測定する際に補正をしなくてすむことになる。

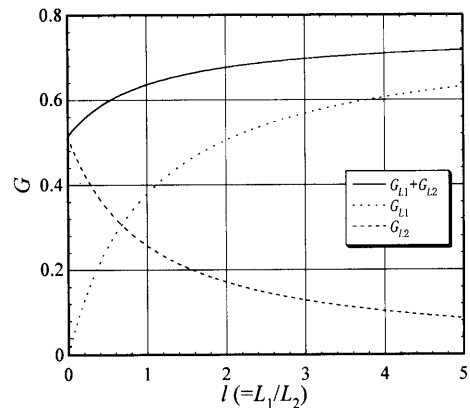


Fig. 4 l dependence of the detection ratio at the total length of the saddle-shaped pickup coil, G , the straight part, G_{L1} and the opening part, G_{L2}

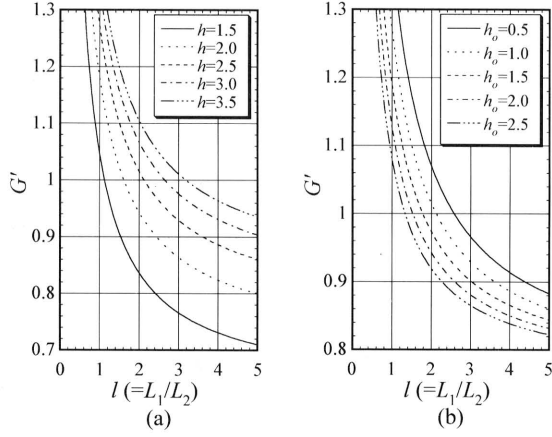


Fig. 5 l dependence of the detection ratio, G' , considering the volume of the sample in the straight part of the saddle-shaped pickup coil with parameters of (a) h and (b) h_o .

2.3 試料位置がピックアップコイル中心からずれた場合の G'

Fig. 6 のように試料線材がピックアップコイルの中心位置から (x_s, y_s) だけずれている場合を考える. このときの磁気モーメント m によるベクトルポテンシャルは(11)式における x, y をそれぞれ $(x-x_s), (y-y_s)$ と置き換えることにより

$$A_z = \frac{\mu_0 m}{2\pi} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{x-x_s}{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2} \quad (18)$$

として得ることができる. これを用いて, ピックアップコイルに鎖交する試料磁化による磁束を(2)~(4)式と同様に計算し, ずれた場合における直線部, 開口部の磁化検出率 g'_1, g'_2 を計算すると

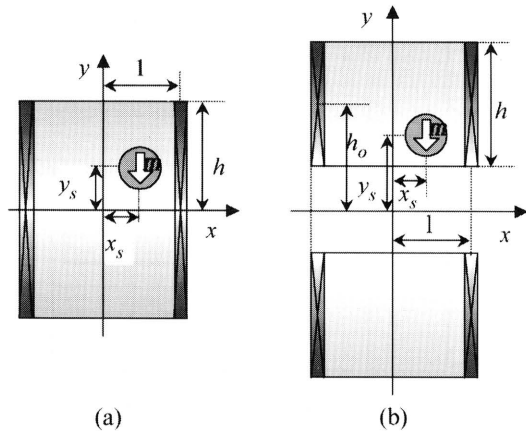


Fig. 6 Arrangement of the pickup coil and the sample in case that the sample deviates from the center of pickup coil

$$g'_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\arctan \frac{h-y_s}{1-x_s} + \arctan \frac{h+y_s}{1-x_s} + \arctan \frac{h-y_s}{1+x_s} + \arctan \frac{h+y_s}{1+x_s} \right) \quad (19)$$

$$g'_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\arctan \frac{h_c+h/2-y_s}{1-x_s} - \arctan \frac{h_c-h/2-y_s}{1-x_s} + \arctan \frac{h_c+h/2-y_s}{1+x_s} - \arctan \frac{h_c-h/2-y_s}{1+x_s} + \arctan \frac{h_c+h/2+y_s}{1-x_s} - \arctan \frac{h_c-h/2+y_s}{1-x_s} + \arctan \frac{h_c+h/2+y_s}{1+x_s} - \arctan \frac{h_c-h/2+y_s}{1+x_s} \right) \quad (20)$$

となる. $x_s=0, y_s=0$ とするとそれぞれ(10), (14)式と一致する. この場合も(17)式と同様に磁化の検出率を

$$G' = \frac{1}{l} \left(\int_0^l g'_1 dz + \int_l^{l+1} g'_2 dz \right) \quad (21)$$

として G' を計算できる. G' の試料位置依存性を **Fig. 7** に示している. ここで $h=2.5, h_o=1.0, l=2.0$ としている. このグラフから x_s つまり x 軸方向のずれが大きいと y_s つまり y 軸方向のずれによる G' の変化が大きくなり, その誤差は最大10%程度であることがわかる. しかし, x_s が小さいと y_s による変化も1%程度である. このことより線材が1本の場合はピックアップコイル中心付近で測定することが望ましいことがわかる

2.4 複数本の試料を用いた場合の G'

実際に交流損失を測定する際には測定感度と S/N 比の関係上, 複数本の試料を用いるのが通常である. そこで, 複数本になった場合の本数や線材間隔に対する磁化検出率 G' の依存性について検討した. 各々の試料線材は同様に磁化されているとして磁気モーメント m で近似し, 横方向に並べた場合の磁化検出率 G'_{have} 及び縦方向に並べた

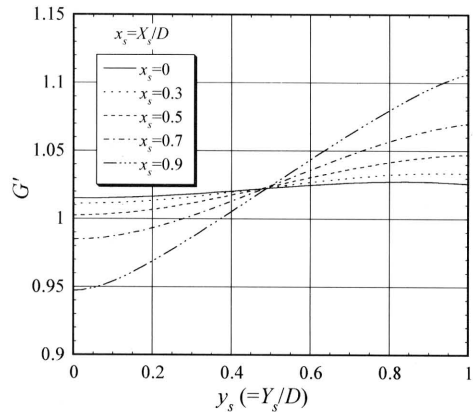


Fig. 7 x_s and y_s dependence of the detection ratio, G'

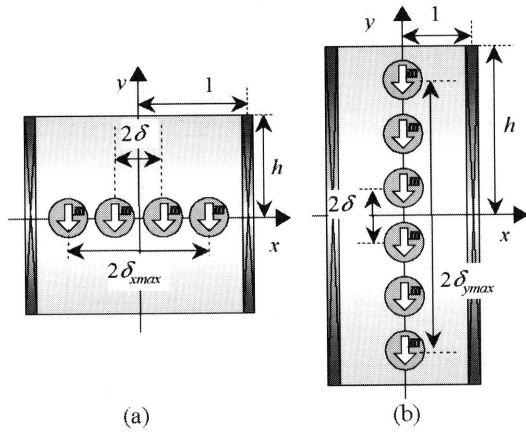


Fig. 8 Arrangement of the pickup coil and the samples in case that samples are arranged with the directions to x -axis and y -axis

場合の検出率 G'_{ave} を次のように定義した.

$$G'_{\text{ave}} = \frac{2}{N} \sum_{\delta_x=\delta}^{(N-1)\delta} \left\{ \frac{1}{l} \left(\int_0^l g'_1 dz + \int_l^{l+1} g'_2 dz \right) \right\} \quad (22)$$

$$G'_{\text{ave}} = \frac{2}{N} \sum_{\delta_y=\delta}^{(N-1)\delta} \left\{ \frac{1}{l} \left(\int_0^l g'_1 dz + \int_l^{l+1} g'_2 dz \right) \right\} \quad (23)$$

ここで δ は線材間の距離の半分, δ_x, δ_y は線材の x 及び y 座標, δ_{max} は線材の配置幅の半分である. これらを **Fig. 8** に示している.

コイル形状を $h = 2.5, h_0 = 1.0, l = 2.0$ としたとき, 試料本数 N をパラメータとした $G'_{\text{ave}}, G'_{\text{ave}}$ の δ 依存性をそれぞれ **Fig. 9** (a), (b) に示す. この図から, 線材間距離が広がると試料本数による依存性が大きくなることがわかった. これは中心軸からずれると磁化検出率が変化するためである. 横方向に並べた場合は検出率の1からのずれは1%以内である. 縦方向に並べた場合でも0 <

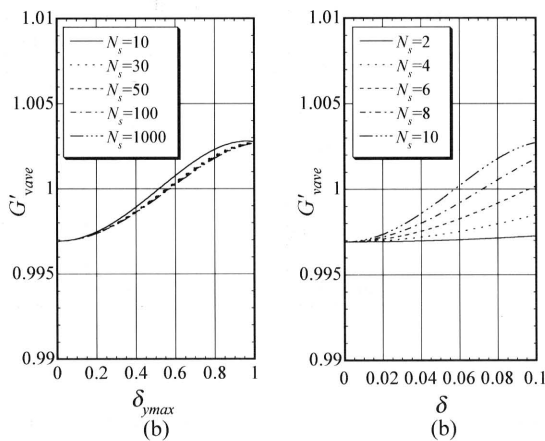


Fig. 9 δ dependence of (a) G'_{ave} and (b) G'_{ave}

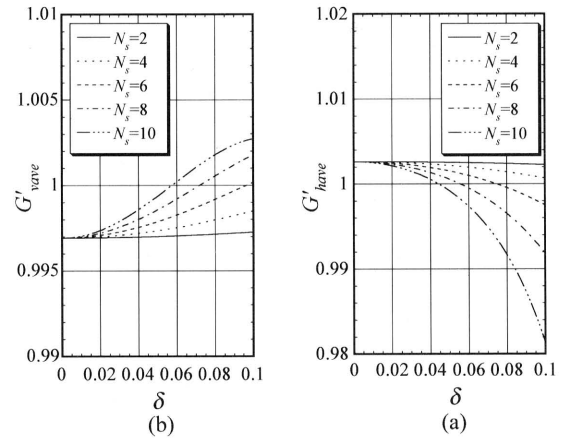


Fig. 10 δ_{max} dependence of (a) G'_{ave} and (b) G'_{ave}

$\delta < 0.1$ の範囲では G の1からのずれは2%程度であり, ほとんど影響はないことがわかった. 試料本数 N をパラメータとした G'_{ave} の δ_{max} 依存性を表すグラフを **Fig. 10** (a), (b) に示す. この図から δ_{max} を固定してその間に入れる本数を変化させてもほとんど G'_{ave} には影響しないということがわかった. 特に本数が30本以上になると δ_{max} が大きくなっても G'_{ave} はほとんど一致していることがわかる. また, $\delta_{\text{max}} < 0.8$ とすると誤差を1%以内に抑えることができる. これらのことより, 本数を多くして測定するときには最高幅を決めておくことで誤差を小さく抑えることができることがわかる.

次に, 測定対象の試料線材を縦方向に10本配置した場合に, 線材間距離 $2\delta = 0.2$ として G'_{ave} の各寸法パラメータ依存性について検討した. この結果を **Fig. 11** (a), (b) に示す. **Fig. 11** (a) では $h_0 = 1.0$, **Fig. 11** (b) では $h = 2.5$ とした. 複数本の試料を用いた場合にも1本の場合の G' とほぼ同様の G'_{ave} の曲線が得られた. このことより複数本の試料を用いて測定を行うことによる磁化の検出率の

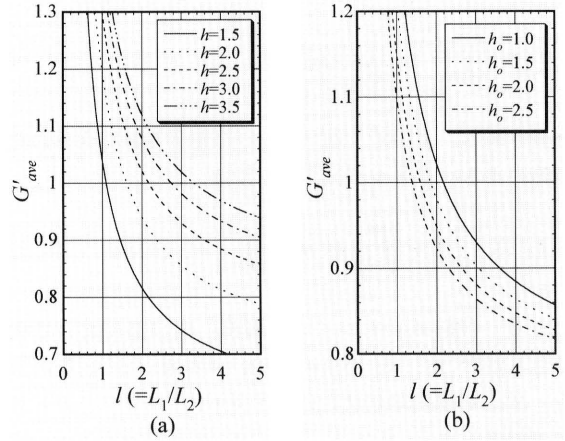


Fig. 11 l dependence of G' in case of 10 stacked samples with parameters of (a) h and (b) h_0

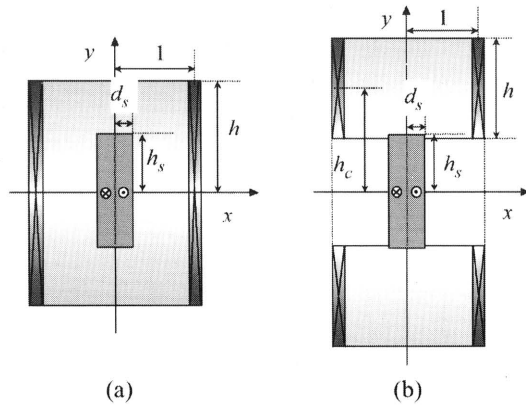


Fig. 12 Arrangement of the pickup coil and the tape sample

変化はほとんど無く、試料の体積を増やして測定感度の向上を図ることは測定誤差に影響を及ぼさないことがわかる。

3. テープ線材の磁化の検出率

次に、テープ線材の交流損失測定時における磁化の検出率について検討する。テープ線材には中心到達磁界以上の磁界が印加されているものとし、試料線材には Fig. 12 に示すように $x > 0$ の部分に z 方向に単位面積当たり j 、 $x < 0$ の部分には $-j$ の様な磁化電流密度分布があるものと仮定した。試料内の位置 (p, q) ($p > 0$) に流れる微小磁化電流 ΔJ が点 (x, y) に作る磁界は次式で表される。

$$\begin{cases} B_x = -\frac{\mu_0 \Delta J}{2\pi} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{y-q}{(x-p)^2 + (y-q)^2} \\ B_y = \frac{\mu_0 \Delta J}{2\pi} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{y-p}{(x-p)^2 + (y-q)^2} \end{cases} \quad (24)$$

ただし、 $\Delta J = jD^2 \Delta p \Delta q$ である。試料内の (p, q) ($p > 0$) における微小磁化電流 ΔJ によって与えられるベクトルポテンシャルは z 成分だけとなり

$$A'_z = \frac{\mu_0 \Delta J}{4\pi} \ln \{ (x-p)^2 + (y-q)^2 \} \quad (25)$$

と表される。よって、点 (x, y) における試料全体の磁化電流によるベクトルポテンシャルは

$$A_z = \int_{-h_s}^{h_s} \left(- \int_{-d_s}^0 A'_z dp + \int_0^{d_s} A'_z dp \right) dq \quad (26)$$

となる。(26)式よりコイル直線部、開口部において測定できる割合 g_1, g_2 を求め、(21)式を用いて G' を計算した。 G'_{tape} の試料形状依存性を Fig. 13 に示す。このときコイルの形状を $h=2.5, h_o=1.0, l=2.15$ とした。この図からテープ状線材試料の幅 d_s の違いが G' へ与える影響はほ

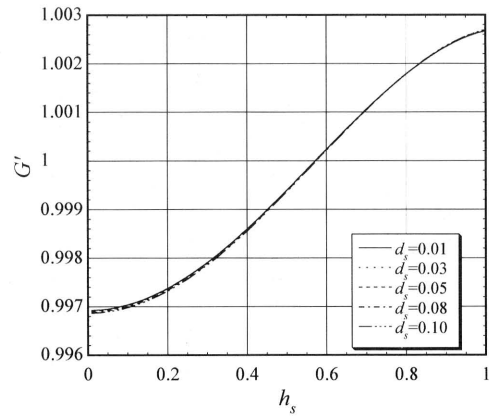


Fig. 13 d_s and h_s dependence of the G'_{tape}

とどないことがわかる。また、試料の厚さ h_s による依存は $0 < d_s < 1$ の範囲で 0.3% 程度であった。このことよりテープ状線材の場合においても、磁化の検出率 G'_{tape} は試料の形状にほとんど依存しないことがわかる。

次に、テープ線材を磁界に対し平行に配置することを仮定した $d_s = 0.02, h_s = 0.33$ の場合と、垂直に配置することを仮定した $d_s = 0.33, h_s = 0.02$ の場合について、 G'_{tape} の l 依存性を h をパラメータとして Fig. 14(a) に、 h_o をパラメータとして Fig. 14(b) に示す。図より、テープ線材の向きによる磁化の検出率 G' の相違はないことがわかる。

Fig. 14 を円断面試料 1 本の場合の G' の l 依存性を示した Fig. 7 と比較すると、 G' は定量的にはほぼ一致しており、試料形状によらず鞍型ピックアップコイルによる交流損失測定が行えることがわかる。このことにより、テープ線材において複数枚試料を積層した場合にも無視できる誤差の範囲内で測定可能であると考えられる。

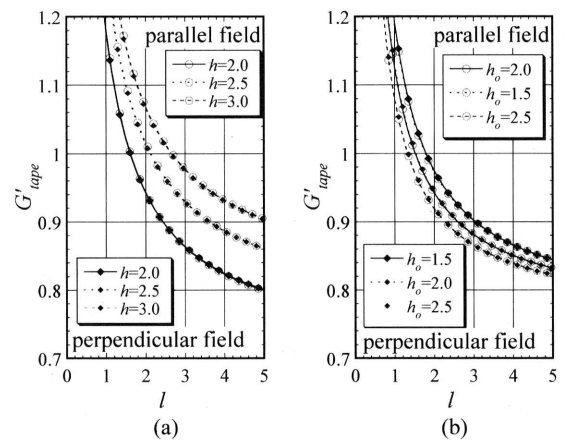


Fig. 14 l dependence of G' tape, in case that the tape sample is in parallel field and in perpendicular field with parameters of (a) h and (b) h_o

4. ま と め

鞍型ピックアップコイルを用いた際の交流損失測定における磁化の検出率を定量的に評価した。試料の等価長さを鞍型ピックアップコイルの直線部長とみなした G' を定義することにより補正なしに交流損失測定を行うことができることを示した。磁化の検出率は試料形状、試料本数にほとんど依存せず、試料配置空間をピックアップコイル幅の8割以内に設定することにより測定誤差を1%以内に押さえることができることがわかった。

実際の鞍型ピックアップコイルの寸法は測定対象のテープ線材サイズ、励磁用マグネットの内径を考慮し決定しなければならない。現状で一般的な幅4mm 厚さ0.25mm程度のサイズのテープ線材の交流損失測定を考えた場

合の鞍型ピックアップコイルの推奨寸法は、幅12mm、高さ30mm、コイル全長50mm (直線部長さ34mm、開口部長さ8mm)、開口部広さ6mmである。このとき $h=2.5$, $h_0=1.0$, $l=2.15$ となり、 $G'=1$ として、補正なく測定することが可能となる。

参 考 文 献

- 1) M. Iwakuma et al., "Ac Losses in Bi2223 Multifilamentary Wires Exposed to an Magnetic Field Perpendicular to the Wide Surface", *Advances Superconductivity X*, pp. 833-836, 1998.7
- 2) M. Iwakuma et al., "Ac Loss properties of a 1 MVA Single-Phase HTS Power Transformer", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 11, No. 1, pp. 1482-1485, 2001.3

