

薄膜超伝導線材で巻かれたコイルの電磁界解析における 軸対称近似の影響の検討

Influence of the axisymmetric approximation on the electromagnetic field analyses of coils
wound with coated conductors

曾我部 友輔, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大)

SOGABE Yusuke, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

薄膜超伝導線材で巻かれたコイルの電磁界解析においては、図 1 に示すように各ターンを閉ループとして近似し(軸対称近似)、それらを入れ子状にしたモデルがよく用いられる。しかし、この近似を適用することによって図 1 に示したような懸念に起因する誤差が発生する可能性がある[1]。

- (1) 線材幅方向の電流密度成分を考慮できないことに起因する遮蔽電流分布の簡略化
- (2) (1)と同様の原因で遮蔽電流の経路が変化することによって生じる遮蔽電流の減衰時定数の変化(L と R の変化)
- (3) コイル形状の変形による発生磁場の変化

今回は、パンケーキコイル(PC)群を対象に、コイルの厳密形状に基づいた電磁界解析モデル(Model SP)と、コイル形状を軸対称近似した電磁界解析モデル(Model AX)を構築し、実際に電磁界解析を行い、(1)と(2)の懸念点について検討を行ったので報告する。

2. 軸対称近似の影響を評価するための電磁界解析

解析対象としたPC群の諸元を表1に示す。今回の解析では、PC群を構成する各PCの一つずつを順次解析対象とし、解析対象ではないPCには線材の中心に一本の線電流が流れていると仮定し、解析を行った。PC群を構成する薄膜線材の超伝導特性は30 Kにおける線材の磁化緩和測定から定めた。通電電流は100 sで300 Aまでランプアップし、その後長時間ホールドした。300 A通電時のPC群中心磁場は2.83 T、線材の最大経験垂直磁界成分は1.44 Tであり、このときのPC群の最弱点における電流負荷率は0.56である。

3. 解析結果

図2にModel SP、Model AXによる解析によって得られた、最上端PCの25ターン目中央における、電流ランプアップ終了直後($t=0$ s)、ランプアップ終了後1000 s経過時、ランプアップ終了後16000 s経過時の線材幅方向電流密度分布を示す。両モデルによって得られた電流密度の差の相対値は 10^{-4} オーダである。また、PCの線材全長にわたっての両モデルの差異をみるため、磁化(線材経験磁場から解析対象以外のPCが発生する磁場を引いたもの)の差の相対値の平均を求めたところ、その値は非常に小さいものとなった。この結果から、(1)の懸念点については、今回の解析対象については、軸対称近似の影響はほぼないといえる。

また、Model SPによって得られた $t=0$ sから $t=16000$ sの電流密度の変化と、Model AXによって得られた $t=0$ sから $t=16000$ sの電流密度の変化はほぼ一致しており、この結果から、(2)の懸念点についても、今回の解析対象については、軸対称近似の影響はほぼないといえる。

付録. 電流分布の時間変化についての考察

ランプアップ終了直後は、ランプアップ時の電磁誘導により 10^{-4} V m $^{-1}$ オーダの比較的高い電界が表れており、超伝導体内の抵抗率は高いため、ランプアップ終了から短時間の間に遮蔽電流は大きく減衰する。その後は線材内の電流密度および電界が低下するため抵抗率も低下し、以降の遮蔽電流の減衰は遅くなる。

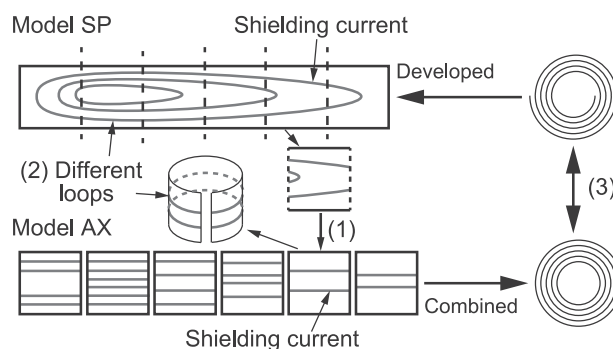


Fig. 1 Schematics of the influence of the axisymmetric approximation and concerns

Tab. 1 Parameters of analyzed pancake coils

Number of PCs	30
Number of turns in each PC	50
Inner / outer radius of PCs	50 mm / 62.45 mm
Height of all PCs	164.5 mm
Conductor length per each PC	18 m

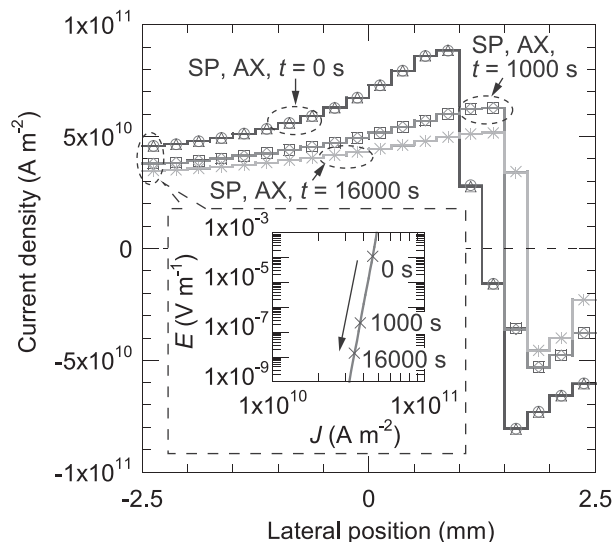


Fig. 2 Lateral current density distribution

謝辞

本研究は科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によって行われた。

参考文献

1. Y. Sogabe et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3 (2015) 4900205

薄膜線材の多芯化による遮蔽電流抑制効果： 短尺線材の結合時定数測定とパンケーキコイルの電磁界解析

Effect of striating coated conductor to reduce screening current: coupling time constant measurements of short sample pieces and electromagnetic analyses of pancake coils

雨宮 尚之, 西本 拓馬, 富永 直樹, 曾我部 友輔(京大・工); 山野 聡士, 坂本 久樹(古河電工)

AMEMIYA Naoyuki, NISHIMOTO Takuma, TOMINAGA Naoki, SOGABE Yusuke (Kyoto University);

YAMANO Satoshi, SAKAMOTO Hisaki (Furukawa Electric)

E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

薄膜線材を多芯化すれば磁化(遮蔽電流磁界)を低減できる可能性がある。ただし、多芯化はフィラメント間の結合電流が減衰してはじめて磁化低減に有効であるが、薄膜線材を金属系多芯超伝導線のようにツイストして結合時定数を低減することは困難である。

2. 多芯薄膜線材でコイルを巻いた場合の結合時定数

多芯薄膜線材によってコイルを巻いた場合、結合電流は、主に薄膜線材に垂直な磁界成分の時間変化によって誘起され、フィラメント間の横断抵抗や線材両端の銅電流端子を介して流れると考えられる。その減衰時定数(結合時定数)は、フィラメント間の横断抵抗、銅電流端子の抵抗、線材長・コイル形状・線材全長にわたっての経験垂直磁界分布で決まる電流パス(すなわち、インダクタンス)によって決定されると考えられる。金属系ツイスト多芯超伝導線の結合時定数に比べればはるかに長いであろうこの結合時定数も、励磁後、時間をかけて結合電流の減衰を待つことができる直流マグネット応用では、許容できる場合もあると考えられる。

3. 短尺線材の結合時定数の実験的評価

古河電工・SuperPower によってフィラメント数 4 の多芯薄膜線材が製作された。この線材では、レーザで超伝導層を分割した後に銅めっきを施しているため、フィラメント間は絶縁されていない。多芯化前の線材の臨界電流は 135.8 A、多芯化後の臨界電流は 130 A 程度であった。

この線材でコイルを巻くことを想定して、結合時定数を実験的に評価した。短尺線材試料や短尺線材をスタックした試料を液体窒素で浸漬冷却し、振幅 $B_m = 1$ mT、周波数 $f = 3$ Hz - 1 kHz の交流磁界を印加し、磁化損失 Q_m を測定した。短尺線材試料の測定結果の一例を Fig. 1 に示す。 $Q_m - f$ 特性に次式で与えられるデバイ型曲線をフィッティングすることにより結合時定数 τ_c を求めることができる。

$$Q_c = A \cdot \frac{2\pi f \tau_c}{(2\pi f \tau_c)^2 + 1} \quad (1)$$

図示した長さ 50 mm の単線試料の場合、 τ_c は約 2 ms である。

まず、長さ $L = 12.5$ mm - 200 mm の短尺線材の $Q_m - f$ 特性を測定し τ_c を求めた。 τ_c は L の 2 乗にほぼ比例し、次式でフィッティングすることができた。

$$\tau_c = 0.922L^2 \quad (2)$$

この式から 100 m の直線状線材が一樣な磁界にさらされた場合の結合時定数は約 2.56 時間と見積もられる。

また、数値電磁界解析との比較により横断抵抗を見積もったところ、フィラメント間のスリット 1 本あたり線材長さ方向 1 m あたりの横断抵抗は、 $1.85 \times 10^{-8} \Omega$ m であった。

上記は直線状線材の場合であるが、例えばパンケーキコイルを考えれば、ターン間が近接して巻かれるために、各ターンの結合電流が相互結合し(相互インダクタンスを含めたインダクタンスが大きくなり)、結合時定数が大きくなることも予想される。そこで、この影響を見極めるために、 $L = 50$ mm の短尺線材を 2, 4, 8 本とスタックした試料の磁化損失を測定し τ_c を

求めた。スタックする線材の間隔も 50 μ m, 100 μ m, 1 mm と変化させて実験を行った。結果をまとめると以下の通りである。

- ・スタックすると τ_c は大きくなるが、8 本程度で飽和する。
- ・線材間隔が小さいほどスタックによる τ_c の増大は顕著になる。
- ・線材間隔 50 μ m、線材本数 8 本の場合、単線に比較して τ_c は 2.26 倍程度となった。

4. 多芯薄膜線材で巻いたパンケーキコイルの電磁界解析

3. の線材と同じ横断抵抗 ($1.85 \times 10^{-8} \Omega$ m) でフィラメント数 2 の多芯薄膜線材で巻いたパンケーキコイルを、50 個のパンケーキコイルをスタックしたコイルの端におき、他の 49 個のパンケーキコイルが作る磁界を印加した状態で電磁界解析を実施した。比較のために、同様な分布の磁界にさらされる直線状線材の電磁界解析も行った。それぞれの結合が切れるまでの時間(電流分布で判断) τ_{dc} を Table 1 に比較した。直線状線材に比べてパンケーキコイルでは τ_{dc} が大きくなっているが、3. の τ_c の増大より顕著である。差異の原因(フィラメント数、実験における線材間の位置ずれ等)は今後の検討課題である。

参考文献

- [1] N. Amemiya et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 17, No. 12 (2004) p. 1464-1471.

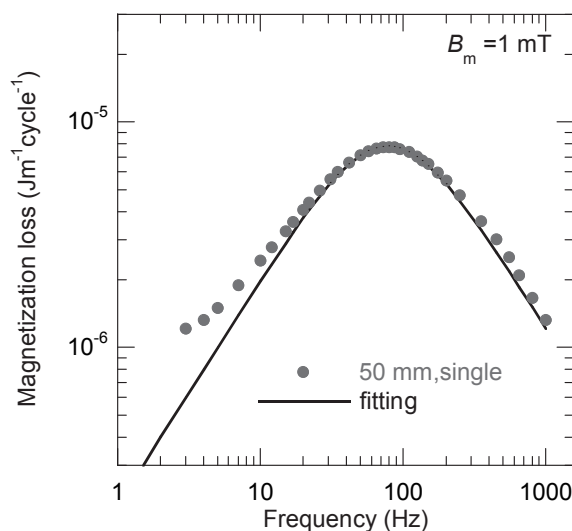


Fig. 1 Temporal evolution of dipole component

Table 1 Time required to decouple completely τ_{dc}

Conductor length	Pancake coil		Straight conductor
	No. of turn	τ_{dc}	τ_{dc}
0.31 m	1	1.2 s	1.4 s
0.63 m	2	5.8 s	5.4 s
1.58 m	5	110 s	60 s
3.18 m	10	620 s	190 s
6.45 m	20	3650 s	680 s

新しい高温超電導コイル構成法による遮蔽電流磁界低減の実験的検証

Experimental Verification on Reduction of Screening-Current-Induced Fields Using New Structure of HTS Coil

本田 智和, 岡部 祐麻, 柁川 一弘 (九大)

HONDA Tomokazu, OKABE Yuma, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.)

E-mail: t_honda@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

MRI や NMR 用の超電導マグネットには高い磁界均一度が必要であり、現在低温超電導 (LTS) 多芯線が用いられている。一方、高温超電導 (HTS) 線はテープ形状であるために幅広面内に遮蔽電流が誘起されて垂直方向に大きく磁化し、それを巻いたコイルは遮蔽電流が作る磁界 (遮蔽電流磁界) により磁界均一度が低くなる。そこで、異常横磁界効果により HTS テープ線の遮蔽電流を低減する方法が提案されている [1,2]。また、銅消磁コイルを用いて微小な交流磁界を HTS コイルに印加することにより、遮蔽電流磁界を低減可能なことも実証されている [1-3]。今回は、銅コイルを別途使用せず、消磁コイルの同軸配置を簡略化した新しい HTS コイル構成法を提案し、その遮蔽電流磁界低減の有効性を実験的に検証した。

2. 新しい HTS コイル構成法の提案および製作

今回提案する HTS コイル構成法は、HTS 層巻きコイルのうち内側および外側の一部を消磁コイルとして兼用するものである。Fig. 1 に示すように、HTS 層巻きコイル全体に直流電流 I_{DC} を流しながら、内側および外側の数層にそれぞれ互いに逆向きの交流電流 I_{AC} を流すことで、遮蔽電流磁界を低減できることが期待される。この構成法によって銅コイルが別途不要となり、小型化が期待できる。一方、消磁コイルと兼用しているため、HTS コイルの一部が消磁できないという欠点もある。上記提案に基づいて製作した HTS コイルの諸元を Table 1 に示す。HTS コイルは全 20 層のうち内側と外側の 6 層ずつを消磁コイルとして兼用した。コイル製作に使用した HTS テープ線は、幅 5.02 mm、厚さ 0.159 mm であり、77 K・自己磁界下の臨界電流 I_c は 256 A である。製作した HTS コイルは、内径 63.0 mm、外径 72.1 mm、平均高さ 88.3 mm、巻数 346 + 1/4 ターンである。これらのコイル諸元を基に見積った中心磁界は 3.91 mT/A である。

3. 実験結果

製作した HTS コイルを液体窒素中に浸漬冷却し、その中心磁界をホール素子で計測した。HTS コイルを直流 60 A まで励磁して 60 秒保持した後、内側と外側の 6 層ずつに周波数 10 Hz の交流電流を 600 秒間通電し続けた場合の実験結果を、Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、交流電流を通電することで、中心磁界がわずかに増加することがわかる。また、交流電流振幅が大きくなるほど飽和の上昇幅が小さくなる。60 A 通電した場合の中心磁界は 234.6 A と見積られるため、原理上完全な消磁は期待できないが、大部分は消磁されていると推察される。

参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 125005
2. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 22

(2012) 4400404

3. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 4400504

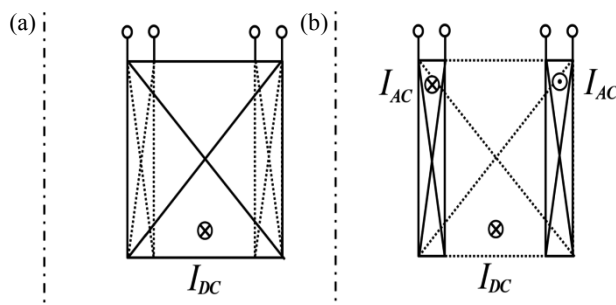


Fig. 1 Schematic illustration of HTS coil operation for (a) energization/holding and (b) degaussing.

Table 1 Specifications of HTS coil.

Tape width	5.02 mm
Tape thickness	0.159 mm
Tape I_c at 77 K in self-field	256 A
Inner diameter of coil	63.0 mm
Outer diameter of coil	72.1 mm
Average height of coil	88.3 mm
Number of layers of coil	20 (6 + 8 + 6)
Total number of turns	346 + 1/4

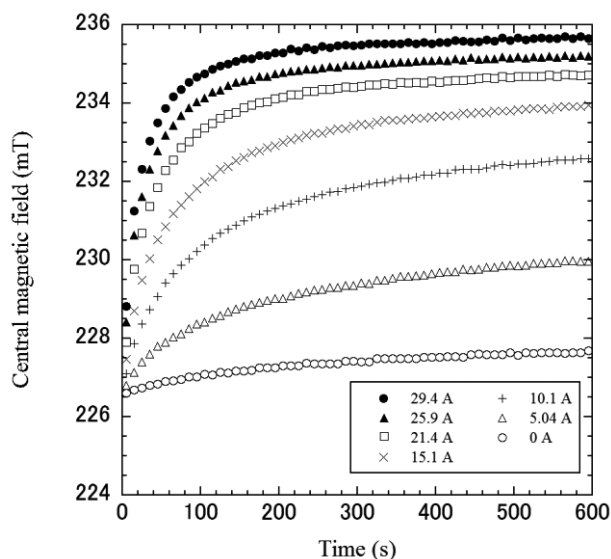


Fig. 2 Time evolutions of central magnetic fields in HTS coil by applying AC currents with different amplitudes.

REBCO 超伝導コイルにおける磁化緩和の測定と解析(3)

Measurement and analysis of the relaxation of magnetization in REBCO superconducting coils (3)

鍋倉航平, 岩熊成卓, 佐藤誠樹, 吉田幸市(九州大学); 富岡章, 今野雅行(富士電機); 和泉輝郎, 町敬人, 衣斐顕(AIST)
 NABEKURA Kohei, IWAKUMA Masataka, SATO Seiki, YOSHIDA Koichi (Kyushu University);
 TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co. Ltd.); IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira (AIST)
 E-mail: nabekurak@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

現在REBCO超伝導線材を用いたMRI用超伝導マグネットの研究開発が進められており、液体窒素温度での使用や高磁界化といったさらなる発展が期待されている。しかしながら、REBCO線材幅広面に印加される磁界により誘起された遮蔽電流がマグネット発生磁界を乱し、ppmオーダーの磁界均一性が要求されるMRI用マグネットではこの影響が重大な問題となる。本研究では、レーザースクライビングによって4本フィラメントに加工したREBCO線材を用いて小型テストコイルを試作し、通電時のコイル中心における磁界変化を観測した。無分割線材を用いたテストコイルと比較検討することでマルチフィラメント化による遮蔽電流の抑制効果を検証した。

2. 実験

5mm幅30m長EuBCO線材をレーザースクライビングにより4本フィラメント線材に加工し、テストコイルを試作した。テストコイルの諸元をTable.1に示す。これを、Fig.1に示すように別容器に格納してNbTiマグネット内部に配置し、サブクール液体窒素を用いて65-77Kに浸漬冷却した。また、NbTiマグネットは永久電流運転し、0-2Tの直流バイアス磁界 B_{dc} を印加した。REBCOテストコイルにはステップ状に輸送電流 I_{op} を与え、目標の電流値に到達した後、約10分間その電流値をホールドして、コイル中心磁界をガウスメーターにより観測した。

3. 実験結果及び考察

テストコイルを65Kに冷却し、1Tの直流外部磁界中で通電した場合のコイル中心磁界の観測結果をFig.2,3に示す。このテストコイル中心磁場の磁界変化を定量的に表すために、次式による近似を行った。

$$B_{center} = B_0 + B_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + B_2 \ln t \quad (1)$$

B_0 は電流値が目標値に到達した時($t=0$)の中心磁界であり、 B_2 、 τ の2つの値により磁界変化を評価した。Fig.4にスクライビング加工を施したコイルと施していないコイル両方の B_2 を示す。これより B_2 は I_{op} と共に増加した後、臨界電流値 I_c 近傍で減少しており、さらにスクライビング加工を施すことによっても B_2 は減少している。これよりコイルの遮蔽電流を減衰させるために、4分割線材を用いる事と I_c 近傍での通電が有効だと明らかとなった。

謝辞

本研究は、高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

Table.1 Parameters of EuBCO Superconducting Test Coil

Tape Dimensions	5 mm in width, 112 μ m in thickness
Number of filaments	4
Winding	Solenoid (19 turn/layer, 6 layers)
Height	102 mm
Inner diameter	80 mm
Outer diameter	81.8 mm
Bobbin	GFRP
Magnetic field	1.14 mT/A

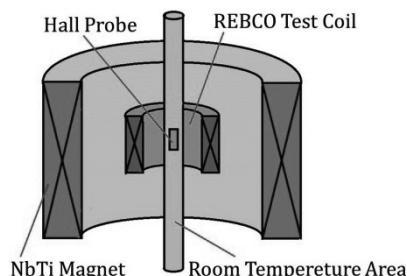


Fig.1 Positional relation between NbTi Magnet and EuBCO test coil.

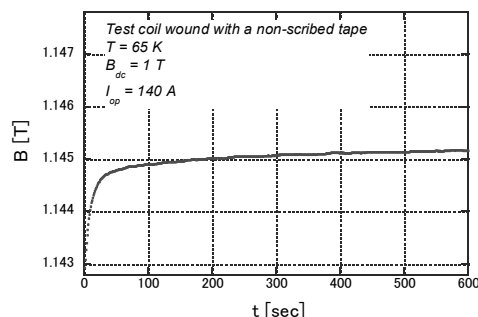


Fig.2 Observed variation of the magnetic field at the center of the test coil wound with a non-scribed tape.

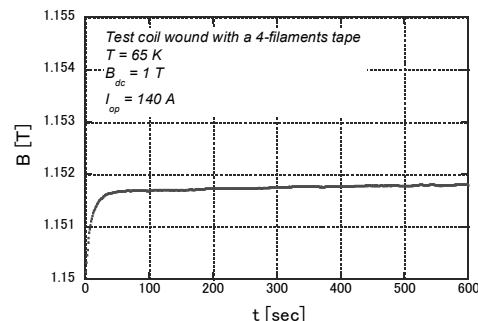
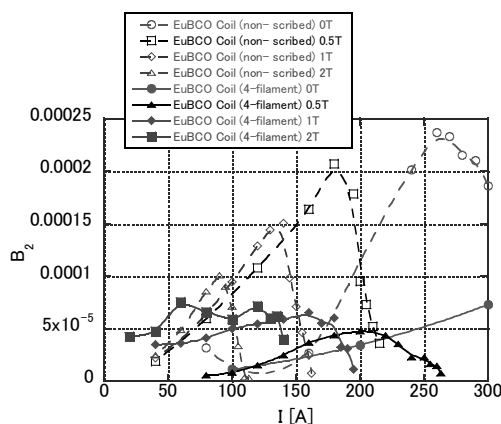


Fig.3 Observed variation of the magnetic field at the center of the test coil wound with a 4-filament tape.

Fig.4 Observed I_{op} dependences of B_2 of the test coils at 65 K