

(109) 超電導工学

酸化物超伝導テープ線材の臨界電流特性を基にした 超伝導コイルの構成と配置の検討

Study of superconducting coil configuration and arrangement based on critical current characteristics of oxid superconducting tape

野田 優利奈

Yurina Noda

吉田 大将

Hiromasa Yoshida

原田 直幸

Naoyuki Harada

山口大学大学院 創成科学研究科

1 はじめに

超伝導コイルは医療用 MRI や磁気浮上式鉄道に
応用されている。一般に、超伝導線材を用いてコイル
を作製する場合、巻線部の磁束密度の最大値と使用
する線材の臨界電流特性をもとに設計を行う^[1]。
一方、酸化物超伝導テープ線材には線材の幅広面
に対して垂直方向に磁場を印加すると臨界電流が低下
する性質がある。そのため、酸化物超伝導テープ線
材を用いて超伝導コイルを設計する際には、コイル
内のテープ線材に印加される磁場の方向と線材の臨
界電流特性をもとに設計を行う必要がある。

そこで、本研究では酸化物超伝導テープ線材を用
いてソレノイドコイルを設計する場合、テープ線材
の臨界電流特性を最大限利用できるようなコイルの
構成と配置について、コイルに流すことができる最
大の電流値とコイル空間内の磁束密度の分布に着目
して検討を行った。

2 ソレノイドコイルの磁場分布

検討を行ったソレノイドコイルの断面図を図 1 に
示す。ソレノイドコイルは、市販されている Bi 系ま
たは Y 系の酸化物超伝導テープ線材を用いてパンケ
ーキコイルを作製し、それらを軸方向に 19 個重ね
る場合を考えた。Bi 系テープ線材^[2]の幅は 4.3 mm、
厚さは 0.23 mm で、Y 系テープ線材^[3]の幅は 4.0 mm、
厚さは 0.13 mm である。1 個のパンケーキコイルの内
半径は 35 mm、外半径は 70 mm とし、パンケーキコ
イルのターン間には絶縁材を挟むものとしている。
軸方向に重ねたパンケーキコイル間は冷却チャン
ネルを設けることを想定し、19 個のパンケーキコ
イルと冷却チャンネルを合わせたソレノイドコイルの軸
方向の長さは 100 mm とする。ただし、本検討で磁
場計算を行う際は、計算の簡略化のため、図 1 に示
したパンケーキコイルと冷却チャンネルを巻線部分
と表現し、この巻線部分に均一に電流が流れるよう
に設定した。

ソレノイドコイルの断面とコイル周辺の磁束密度
の分布を図 2 に示す。図中の白い曲線は磁束線を示

している。磁束密度が最大になるのは図中に黒丸で
示すように巻線部分の最も内側で軸方向の中心部で
ある。また、コイルのテープ線材の幅広面に対して
平行方向に磁場を印加した場合の磁場を「平行磁場」、
線材の幅広面に対して垂直方向に磁場を印加した場
合の磁場を「垂直磁場」とし、ここでは、それぞれ
記号で B_{\parallel} , B_{\perp} と表現する。コイルの平行磁場分布と
垂直磁場分布を図 3(a), (b) にそれぞれ示す。図中の
黒丸は、平行磁場と垂直磁場がそれぞれ最大となる
ところである。平行磁場が最大となるのは巻線部分
の最も内側の部分で、垂直磁場が最大となるのは巻
線部の側面部分であることがわかる。この形状のソ
レノイドコイルへの通電電流を 20 A としたとき、
最大平行磁場は 0.43 T、最大垂直磁場は 0.19 T とな
り、最大平行磁場と最大垂直磁場の比を求めると
2.3 となった。

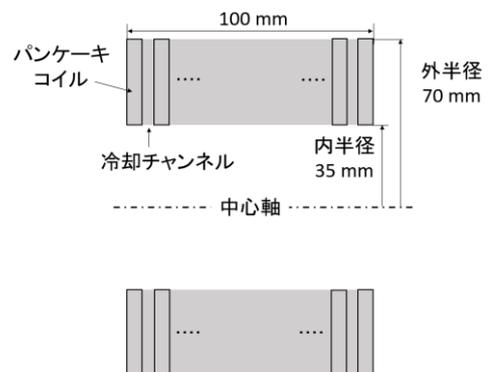


図 1 検討を行ったソレノイドコイルの断面図

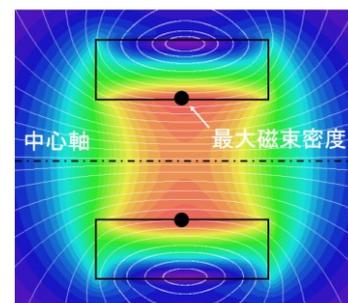
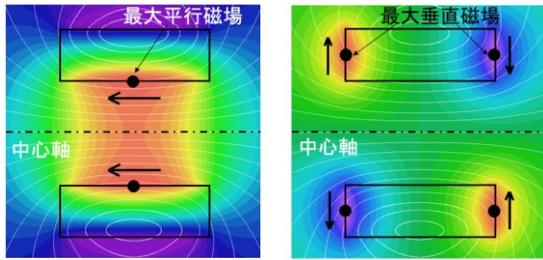


図 2 ソレノイドコイル断面の磁束密度分布



(a) 平行磁場の分布 (b) 垂直磁場の分布
図3 ソレノイドコイル断面の平行磁場と垂直磁場の分布

3 酸化物超伝導線材の臨界電流特性

本研究の検討に用いた Bi 系テープ線材^[2]と Y 系テープ線材^[3]の 77 K における臨界電流の磁場依存性を図 4 に示す。線材の臨界電流は印加磁場が大きくなると減少し、平行磁場を印加した場合に比べて垂直磁場を印加した場合の臨界電流は小さくなることわかる。次に、図 4 中の赤の矢印で示したように、それぞれの線材の各臨界電流に対する平行磁場と垂直磁場の比を求めた。Bi 系テープ線材の平行磁場と垂直磁場の比 $B_{||} / B_{\perp}$ を図 5 に示す。Bi 系テープ線材では、66 K, 77 K において $B_{||} / B_{\perp}$ は 8 ~ 11 程度になっていることがわかった。また、市販の Y 系テープ線材の平行磁場と垂直磁場の比 $B_{||} / B_{\perp}$ を図 6 に示す。Y 系テープ線材では、65 K, 77 K の $B_{||} / B_{\perp}$ は約 3 でソレノイドコイルの $B_{||} / B_{\perp} = 2.3$ に近い値であるが、温度が低くなるにつれて $B_{||} / B_{\perp}$ は大きくなり、40 K では 7 程度まで、30 K では最大で 16 程度まで大きくなっていることがわかった。

線材の $B_{||} / B_{\perp}$ がソレノイドコイルの $B_{||} / B_{\perp} = 2.3$ よりも十分に大きい場合でソレノイドコイルを設計するには、線材の臨界電流特性と負荷直線の関係から、コイルの巻線部分の最大平行磁場と最大垂直磁場の比 $B_{||} / B_{\perp}$ を線材の $B_{||} / B_{\perp}$ に近づけることで、線材の臨界電流特性を最大限に利用することができ、コイルに流すことができる最大の電流を大きくできると考えられる。そこで、第 2 節に示したソレノイドコイルの形状において、コイル側面の垂直磁場を低減し、コイルの比を $B_{||} / B_{\perp} = 2.3$ より大きくするコイルの構成や配置の検討を行った。

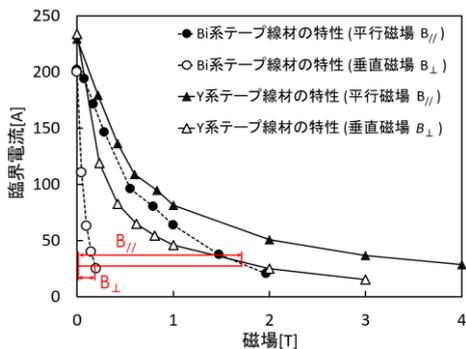


図4 Bi系テープ線材^[1]とY系テープ線材^[2]の臨界電流の77 Kにおける磁場依存性

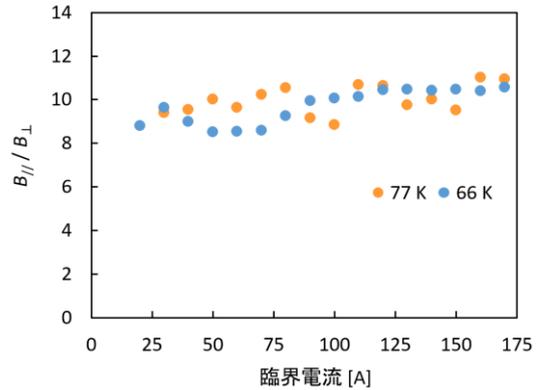


図5 Bi系テープ線材^[2]の各臨界電流に対する平行磁場と垂直磁場の比

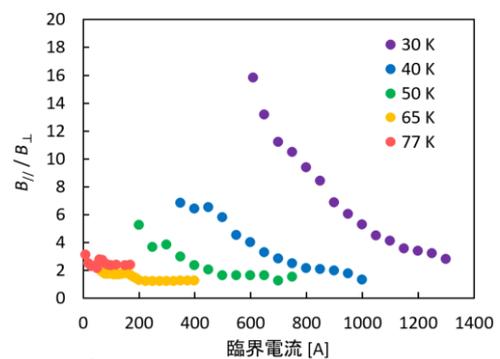


図6 Y系テープ線材^[3]の各臨界電流に対する平行磁場と垂直磁場の比

4 コイルの垂直磁場を低減する方法の検討

コイル側面部分や側面に近い巻線部分の垂直磁場を低減して、コイルの巻線部分の最大平行磁場と最大垂直磁場の比 $B_{||} / B_{\perp}$ を大きくするために、以下の 2 通りの方法を検討した。

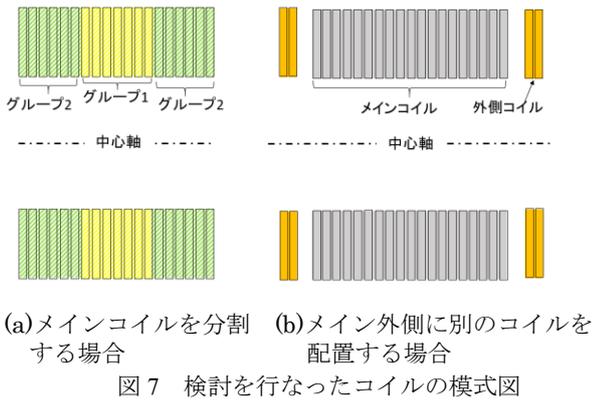
① コイルを軸方向に分割して電流密度を変える方法

コイル側面の垂直磁場を低減させるため、図 7(a) に示すようにコイルを軸方向に分割し、コイル側面付近の巻線部の電流密度を小さく設定する。コイルの電流密度は、パンケーキコイルのターン間の絶縁材の厚さを変化させるものとする。図 7(a) はコイルを 3 分割した場合の模式図を示している。

② メインコイルの外側に別のコイルを配置する方法

図 7(b) に示すように、メインコイルの外側に別のコイルを配置し、メインコイル側面部の垂直磁場を減少させるように外側のコイルに電流を流すようにする。図 7(b) はメインコイルの外側にダブルパンケーキコイルを 1 つずつ配置した場合を示している。

この 2 通りの方法について、コイルの最大平行磁場と最大垂直磁場の比 $B_{||} / B_{\perp}$ を求め、さらに、それぞれコイルに流すことができる最大の電流とコイル空間内の磁場分布についても検討を行なった。



4.1 コイルを分割して電流密度を変える方法

ソレノイドコイルを3分割, 5分割, 9分割した場合について検討を行った結果について述べる. 分割なしコイルの通電電流を 20 A とした場合の起磁力が 45600 A であることから, それぞれ分割したコイル全体の起磁力も同じ値に設定した. また, コイル側面の垂直磁場を低減させるため, コイル側面付近の電流密度が小さくなるようにグループ毎に電流密度を変化させ, かつ巻線部の垂直磁場が均一に近づくように調整した. この検討により得られた中央の電流密度を基準としたグループ毎の電流密度の比の結果と軸方向の長さを表 1 に示す.

それぞれ分割したコイルの巻線部分における最大平行磁場と最大垂直磁場の比 $B_{||} / B_{\perp}$ を図 8 に示す. 分割しない場合の $B_{||} / B_{\perp}$ は 2.3 であるが, 分割数を増やすことで $B_{||} / B_{\perp}$ は大きくなり, 9分割したコイルでは 4.0 まで大きくすることができた.

Bi 系テープ線材の 66 K と 77 K における垂直磁場を印加した場合の臨界電流の磁場依存性と各分割コイルでの垂直磁場が最大となる部分における負荷直線を図 9 に示す. 図中の原点から伸びる直線は各分割コイルにおいて垂直磁場が最大となる部分での負荷直線を示している. コイルに流すことのできる最大の電流の値は, 線材の臨界電流の磁場依存性とコイルの負荷直線の交点となる. ここでは, この交点のコイルに流すことのできる最大の電流の値を「コイルの臨界電流」と表現する. 分割数が多くなるにつれて, コイルの臨界電流が大きくなることがわかった. 例えば, 66 K においては, 分割なしの場合の臨界電流は 40 A であるが, 9分割すると 80 A まで大きくなった. コイルの臨界電流が大きくなり, 電流密度が大きくなると, その結果コイルに使用する線材は少なくて済む. 例として, Bi 系超伝導テープ線材を用いた場合での分割したコイルに使用する超伝導線の長さを図 10 に示す. 分割なしの場合に使用する超伝導線の長さを 1 として比較している. コイルの分割数を増やす毎にコイルに使用する超伝導線を少なくすることができ, 分割なしのコイルと比較

して5分割, 9分割したコイルでは使用する超伝導線を 1/2 以下にできることがわかった.

次に, 9分割したコイルの断面の磁束密度分布を図 11 に示す. また, それぞれ分割したコイルにおいて, コイルの中心軸上に沿った磁束密度の分布を図 12 に示す. コイルの中央断面からの距離を横軸にとり, それぞれコイル内空間の中心の磁束密度の値を 1 として規格化している. コイルの磁束密度の分布は, コイル中心から離れるにつれて徐々に小さくなっていくが, 分割したコイルは, 分割なしのコイルに比べて磁束密度の変化が大きく, コイル内空間の磁束密度の均一性が悪くなる結果となった.

表 1 分割したコイルの電流密度の比と軸方向の長さ

コイル	グループ毎の電流密度の比 (軸方向の長さ [mm])								
	1 (100)								
分割なし	1 (100)								
3分割コイル	0.402 (33)			1 (34)			0.402 (33)		
5分割コイル	0.260 (20)		0.420 (20)		1 (20)		0.420 (20)		0.260 (20)
9分割コイル	0.164 (11)	0.229 (11)	0.305 (11)	0.382 (11)	1 (12)	0.382 (11)	0.305 (11)	0.229 (11)	0.164 (11)

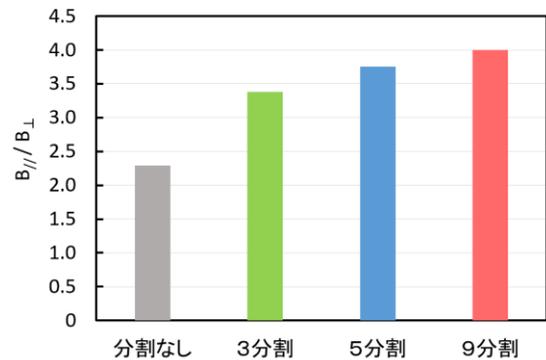


図 8 コイルを分割する場合の最大平行磁場と最大垂直磁場の比

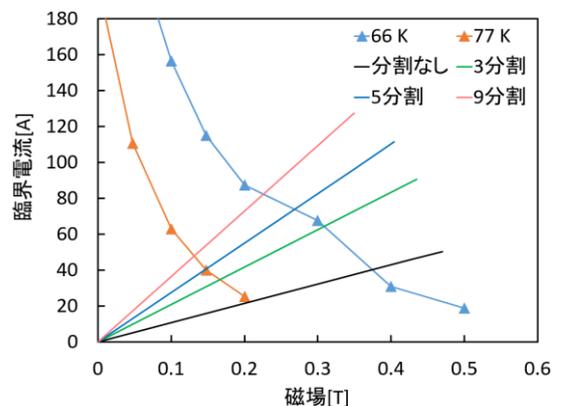


図 9 Bi 系テープ線材の特性とコイルの垂直磁場が最大となる所における負荷直線

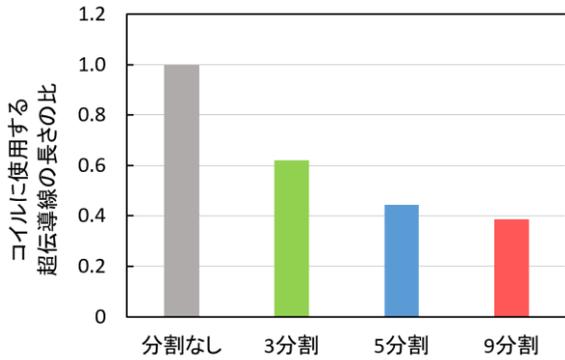


図 10 Bi 系超伝導テープ線材を用いた場合の coils に使用する超伝導線の長さの比較

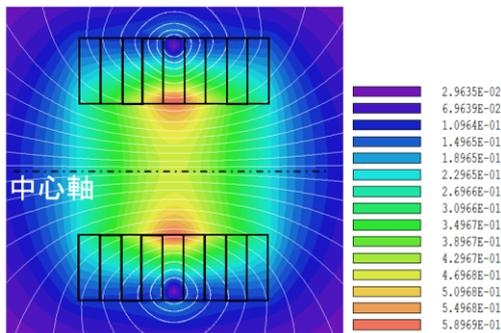


図 11 9 分割した coils の磁束密度分布

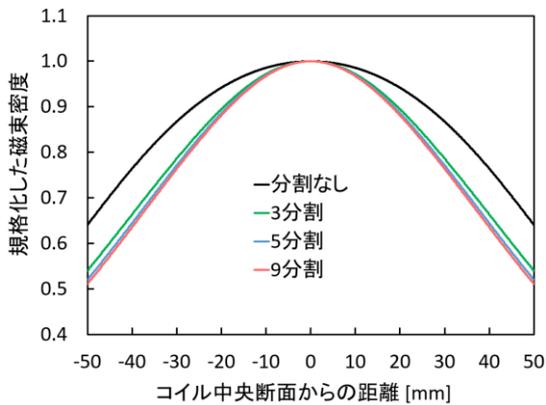


図 12 中心軸に沿った coils 内空間の磁束密度分布

4.2 外側に coils を配置する方法

メイン coils の外側に、シングルパンケーキ coils とダブルパンケーキ coils を 1 つずつ、または 2 つずつ配置し、それぞれの場合で coils 間の幅を調節し、垂直磁場が最も低減した場合における最大平行磁場と最大垂直磁場の比 $B_{//} / B_{\perp}$ と coils の負荷直線、coils 空間内の磁束密度分布の検討を行った。外側に配置した coils の軸方向の長さは、シングルパンケーキ coils が 4.3 mm、ダブルパンケーキ coils が 9.6 mm である。また、外側に配置した coils の電流密度は、メイン coils の通電電流を 20A としたときの巻線部分の電流密度 13.03 A/mm² と同

じ値になるように設定した。

外側に coils を配置した場合の最大平行磁場と最大垂直磁場の比 $B_{//} / B_{\perp}$ をそれぞれ図 13 に示す。外側に別の coils を配置することにより、メイン coils 側面の垂直磁場を低減させることができ、両側にダブルパンケーキ coils を 2 つずつ配置した場合は、 $B_{//} / B_{\perp}$ を 3.6 まで大きくできることがわかった。また、Bi 系テープ線材の垂直磁場を印加した場合の臨界電流の磁場依存性と外側に別の coils を配置した場合のメイン coils で垂直磁場が最大となる所における負荷直線を図 14 に示す。外側に別の coils を配置する方法でも、coils の臨界電流が大きくでき、66 K で両側にダブルパンケーキ coils を 2 つずつ配置した場合には、53 A まで大きくできることがわかった。さらに、Bi 系超伝導テープ線材を用いた場合の coils に使用する超伝導線の長さの比較を図 15 に示す。メイン coils のみで、外側 coils なしの場合に使用する超伝導線の長さを基準として比較している。外側に別の coils を配置する場合、配置したパンケーキ coils の数に応じて使用する超伝導線は長くなり、両側にダブルパンケーキ coils を 2 つずつ配置した場合には、外側 coils なしの場合の 1.4 倍の線材を使用する必要がある。

次に、ダブルパンケーキ coils を 2 つずつ配置した場合の coils 断面の磁束密度分布を図 16 に示す。また、それぞれ外側に別の coils を配置する場合において、coils の中心軸上に沿った磁束密度の分布を図 17 に示す。coils 内空間の中心の磁束密度の値を 1 として規格化している。これらより、外側に coils を配置する場合では、メイン coils のみで、外側 coils なしの場合よりも磁束密度の変化が小さく、coils を分割する場合とは異なり、coils 内空間の磁束密度の均一性が保たれていることが確認できる。

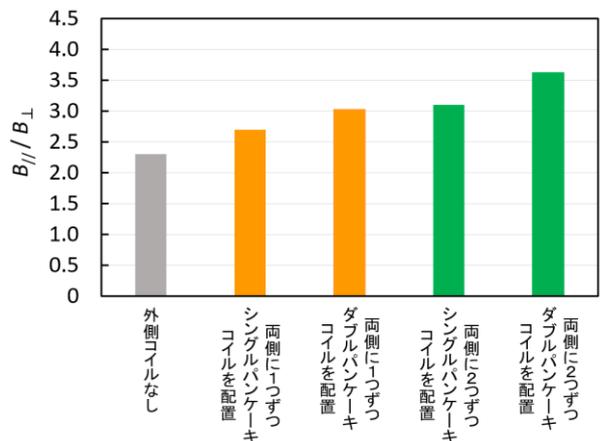


図 13 外側に coils を配置する場合の最大平行磁場と最大垂直磁場の比

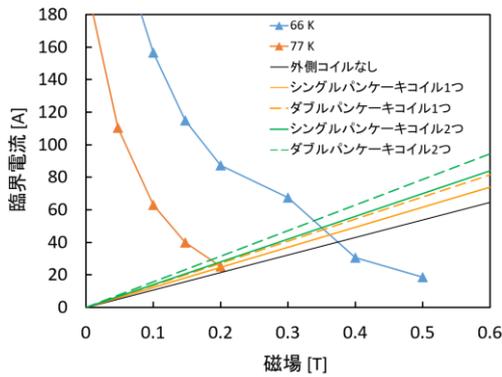


図 14 Bi 系テープ線材の特性とコイルの垂直磁場が最大となる所における負荷直線

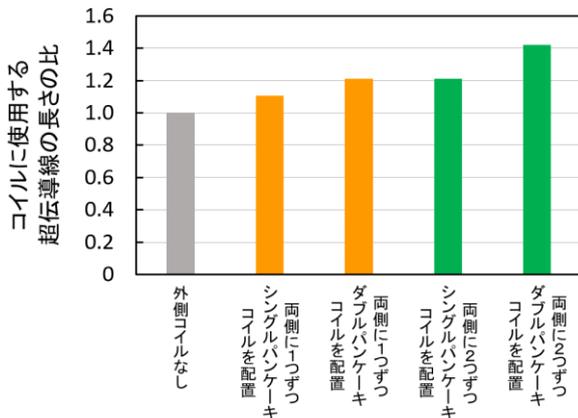


図 15 Bi 系超伝導テープ線材を用いた場合のコイルに使用する超伝導線の長さの比較

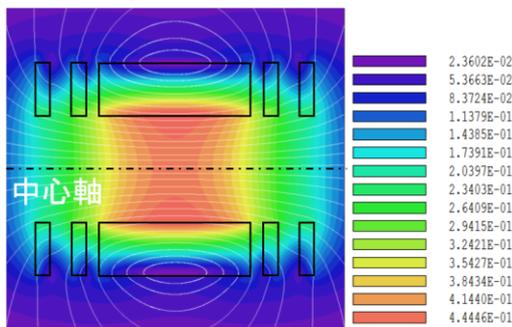


図 16 ダブルバンケーキコイルを2つずつ配置した場合の磁束密度分布

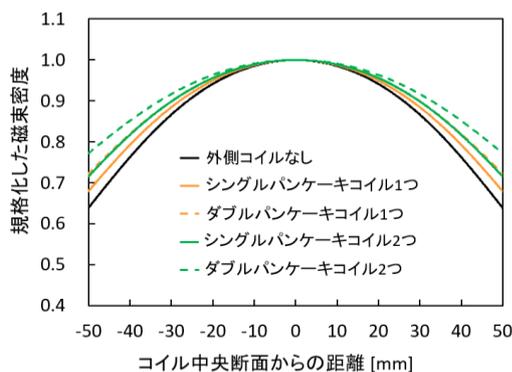


図 17 中心軸に沿ったコイル内空間の磁束密度分布

5 まとめ

検討を行なったソレノイドコイルの最大平行磁場と最大垂直磁場の比が $B_{||} / B_{\perp} = 2.3$ であるのに対して、線材の特性は、Bi 系テープ線材は液体窒素温度で $B_{||} / B_{\perp} = 8 \sim 11$ 程度、Y 系テープ線材では温度が低くなるごとに $B_{||} / B_{\perp}$ は大きくなり、30 K で最大で 16 程度であることがわかった。コイルの最大平行磁場と最大垂直磁場の比を線材の $B_{||} / B_{\perp}$ に近づけるため、コイルを分割して電流密度を変える方法とメインコイルの外側に別のコイルを配置する方法を検討した。コイルを分割する場合は、コイル空間内の磁束密度の均一性が悪くなってしまったが、 $B_{||} / B_{\perp}$ を 9 分割すると 4.0 まで大きくできることがわかった。また、メインコイルの外側に別のコイルを配置する場合は、 $B_{||} / B_{\perp}$ を 3.6 まで大きくでき、コイル空間内の磁束密度の均一性も保つことができた。Bi 系テープ線材の場合、液体窒素温度で $B_{||} / B_{\perp}$ は非常に大きいけれども、2 通りの方法でコイルの $B_{||} / B_{\perp}$ を線材の特性 $B_{||} / B_{\perp}$ に近づける改善が可能であると考えられる。また、Y 系テープ線材の特性の $B_{||} / B_{\perp}$ は、液体窒素温度ではコイルの $B_{||} / B_{\perp}$ と近い値であるため改善の効果は小さいが、40 K 以下の低温域では Bi 系テープ線材と同様に改善が可能であると考えられる。今後は、2 種類のテープ線材の臨界電流の磁場角度依存性を含めて検討を行う予定である。

参考文献

- [1] Martin N. Wilson, "Superconducting magnets", Oxford University Press, pp.20-27, 1986
- [2] https://sei.co.jp/super/hts/type_g.html
- [3] <http://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/superconductor.pdf>