

## 高専シンポジウム口頭発表賞・ポスター発表賞

 $J_c$ - $B$ 特性を考慮した

## 3層超電導電力ケーブルの交流損失解析

(都城高専専攻科機械電気工学専攻)

○村崎宮忠・野地英樹

キーワード：超電導電力ケーブル・交流損失・電気回路モデル・3次元電磁界解析

## 【1. はじめに】

超電導電力ケーブルは超電導材料の高電流密度及び小さな交流抵抗の性質から、従来の送電ケーブルと比較して、大容量、省スペース、損失の低減が期待できる。

超電導電力ケーブルの実用化において、交流損失の低減が課題の1つにある。本研究室では超電導電力ケーブルの交流損失の低減のために電磁界解析を行っている。

本研究では古河電工(株)が行ったYBCO材料を用いた3層超電導電力ケーブルの交流損失測定データ[1]に対する解析結果との比較検討を行った。従来の計算式で研究を行っていたが、測定結果と計算結果には差異が生じており、これは超電導線材の磁束侵入による臨界電流密度の変化( $J_c$ - $B$ 特性)が原因であると考え、 $J_c$ - $B$ 特性を考慮した解析を行った。

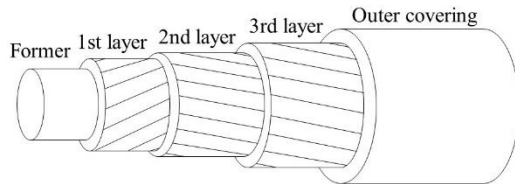


図1. 3層超電導ケーブルの模式図

## 【2. 研究方法】

計算方法

## &lt;1次設計&gt; 電気回路モデル

先行研究[1]には各層の超電導テープの巻き付け方向、巻き付けピッチ(以下、構成パラメータ)は記載されていないため、超電導電力ケーブルの電気回路モデル[2]をもとに最適な構成パラメータを決定するプログラムを数式処理ソフト Mathematica で作成した。これをケーブルの1次設計としている。アルゴリズムとしては、各巻き付け方向に対して、巻き付けピッチを変化させながら、総当たり方式で各層の層電流の偏差が最も小さい構成パラメータを探索するものである。

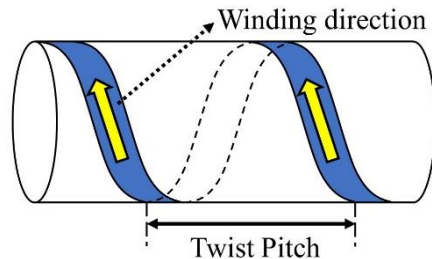


図2. 巻き付けピッチと巻き付け方向

## &lt;2次設計&gt; 3次元電磁界解析

1次設計で得られたパラメータをもとにケーブルの3次元モデルを作成し、このケーブルモデルに対し有限要素法を用いて電磁界解析を行うことを2次設計としている。

有限要素解析にはCOMSOL Multiphysicsを用い、解析手法としてH formulationを用いた。磁場Hを変数とすることでエネルギー積分に必要なE, Jを解析する計算法である。

解析の基本方程式は次のMaxwell方程式と超電導体に適用したオームの法則である。

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \rho_{sc} \cdot \mathbf{J} \quad (3)$$

ただし、 $\rho_{sc} = [\rho_{sc,x}, \rho_{sc,y}, \rho_{sc,z}]$ である。

ここで、超電導体のE-J特性を考慮すれば、 $\rho_{sc}$ の各成分は、

$$\rho_{sc,i} = \frac{E_C}{J_c} \left( \frac{J_i}{J_c} \right)^{n-1} \quad (i = x, y, z) \quad (4)$$

となる。ここで $E_C, J_c$ はそれぞれ臨界電界、臨界電流密度である。上式について $J_c$ - $B$ 特性を考慮すれば、

$$\rho_{sc,i} = \frac{E_C}{J_c(B)} \left( \frac{J_i}{J_c(B)} \right)^{n-1} \quad (i = x, y, z) \quad (5)$$

となる。超電導体の $J_c$ - $B$ 特性は様々なモデルがあるが、本研究では先行研究より、

$$J_c(B_n) = \frac{B_c}{B_c + B_n} J_{c0} \quad (6)$$

を用いた[3]。ここで $B_c$ は任意の定数であり、 $B_n$ は超電導テープに対する垂直な磁束密度である。また $J_{c0}$ は $B_n = 0$ 時の臨界電流密度である。各 $B_c$ に対する $J_c(B_n)$ を図3に示す。

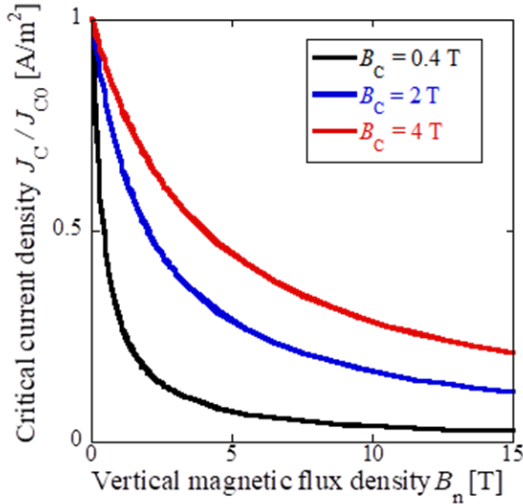


図3. 式(6)の特性

### 【3. 研究結果】

#### ＜1次設計＞

各巻き付け方向の各層の層電流の偏差は以下ようになった。

表1. 各巻き付け方向の最小の電流偏差

SSS	SSZ	SZS	SZZ
$2 \times 10^3$	253	$80 \times 10^3$	36

表より、SZZ巻きが最も電流偏差が小さいことが分かる。よってSZZ巻での構成パラメータを採用した。以下に構成パラメータを示す。

表2. 各層の巻き付けピッチ

$P_1$ [m]	$P_2$ [m]	$P_3$ [m]
0.4	2.1	0.1

#### ＜2次設計＞

1次設計の構成パラメータ $P_1, P_2, P_3$ を用いた超電導電力ケーブルの3次元モデルを作成した。

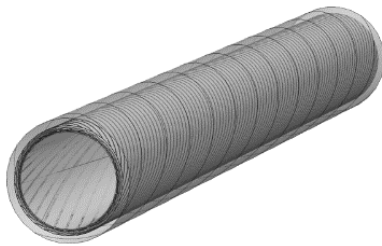


図4. 超電導電力ケーブルの3次元モデル

図4の3次元モデルに対して電磁界解析を行った結果が図5である。

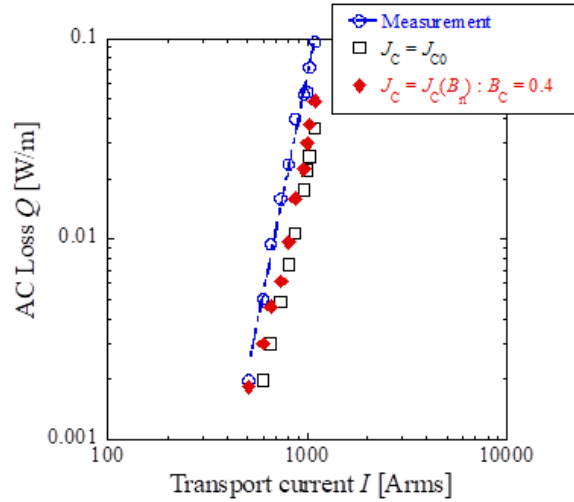


図5. 通電電流特性

### 【4. 考察】

#### ＜1次設計＞

本研究のプログラムでは各層の層電流の偏差を用いて構成パラメータを評価した。図5(黒四角)を見ると、測定値に対して、類似した特性になっている。したがって、1次設計として十分な精度が得られていると考える。

#### ＜2次設計＞

図5より、 $J_c-B$ 依存性を考慮した場合にその特性が測定結果に近づいたことが分かる。また、式(6)の $B_c$ を大きくすることで測定値に近づくのではないかと考える。

### 【5. 結論】

以上の結果から超電導電力ケーブルの電磁界解析では $J_c-B$ 依存性を考慮しなければならないと考える。また本研究は $B_c = 0.4$  [T]の場合のデータのみであるため、これからの研究で $B_c$ を変化させ、通電電流特性を確認し、測定値に一致するような式(6)の $B_c$ が存在するか確認する。また、 $J_c-B$ 特性のモデルの比較検討を行う。

### 【参考文献】

- [1] S. Mukoyama et al., Physica C, 463-465, pp1150-1153(2007)
- [2] H. Noji et al., 低温工学 Vol. 33, No. 3 pp114-120 (1998)
- [3] N. Amemiya et al., Physica C, 484 pp148-152 (2013)

お問い合わせ先

氏名：野地 英樹

E-mail：[noji@cc.miyakonojo-nct.ac.jp](mailto:noji@cc.miyakonojo-nct.ac.jp)