

# 4層REBCO超電導電力ケーブルの交流通電特性

都城工業高等専門学校 機械電気工学専攻

大田 賢志, 野地 英樹

## 概要

本研究では、3次元電磁界解析によって4層REBCO超電導ケーブルに交流を通電した際の損失特性と層電流特性の計算を行う。フジクラ㈱が作製した超電導電力ケーブルを計算対象とするが、各層の超電導テープの巻き方向と巻き付けピッチが公開されていない。そこで、巻方向を内層からSSZZと固定し、電気回路モデルを用いて各層電流ができるだけ均一になる巻き付けピッチを求め、これを計算の初期値として固定した。損失を算出した結果、実験値より計算値が大きく、各層電流も電気回路モデルで算出した値と異なる結果となった。そこで、計算用のケーブルモデルの長さを長くして計算すると損失は著しく減少して測定結果に近づき、各層電流も電気回路モデルで算出した値に近づいた。

## 研究背景

近年、エネルギー需要が増加している。

電力不足や火力発電における二酸化炭素排出による環境問題等がある。

超電導ケーブルの導入

電気抵抗がゼロ。→ 電流を流しても損失が発生しない。→ 送電ケーブルに適している。

超電導とは…特定の金属や化合物を極低温まで冷却したときに電気抵抗がゼロになる現象

ただし、交流電流による送電では、損失が発生する。

常に電流の向きが変化。→ 磁場も頻繁に向きを変える。  
→ ピン止めされていた磁束が動く。  
→ エネルギーが散逸し、電気抵抗が発生。



図1 超電導ケーブル導体

超電導ケーブルの交流送電は損失が発生するが、従来の銅ケーブルと比較して大幅に軽減でき、無駄が少なく送電できる。

超電導ケーブルの実用化に向けて、交流損失を低減できる構造を導くことを目的とする、計算方法の研究をする。

## 計算方法

COMSOLを使用して3次元電磁界解析を行う。

COMSOLとは…有限要素法ベースのシミュレーションソフト

適用する式  
支配方程式: H-formulation  
 $\mu_0$ : 真空の透磁率,  $H$ : 磁界,  $E$ : 電界  
 $J$ : 電流密度  
 $E_c$ : 臨界電界 ( $1 \times 10^{-4}$  V/m),  $J_c$ : 臨界電流密度,  $n$ : 指数値(25)

ファラデーの法則

$$\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \times E = 0 \rightarrow \mu_0 \left[ \frac{\partial H_x}{\partial t}, \frac{\partial H_y}{\partial t}, \frac{\partial H_z}{\partial t} \right]^T + \left[ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right]^T = 0$$

アンペールの法則

$$J = \nabla \times H \rightarrow [J_x, J_y, J_z]^T = \left[ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}, \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}, \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right]^T$$

超電導体内の電界の式

$$E = E_c (J/J_c)^n \rightarrow [E_x, E_y, E_z]^T = [E_c (J_x/J_c)^n, E_c (J_y/J_c)^n, E_c (J_z/J_c)^n]^T$$

損失を求める式

$$P = \frac{f}{L} \cdot \int_0^L dt \int_V E \cdot J dV \text{ [W/m]}$$

$f$ : 周波数(60Hz)  
 $L$ : ケーブルモデルの長さ

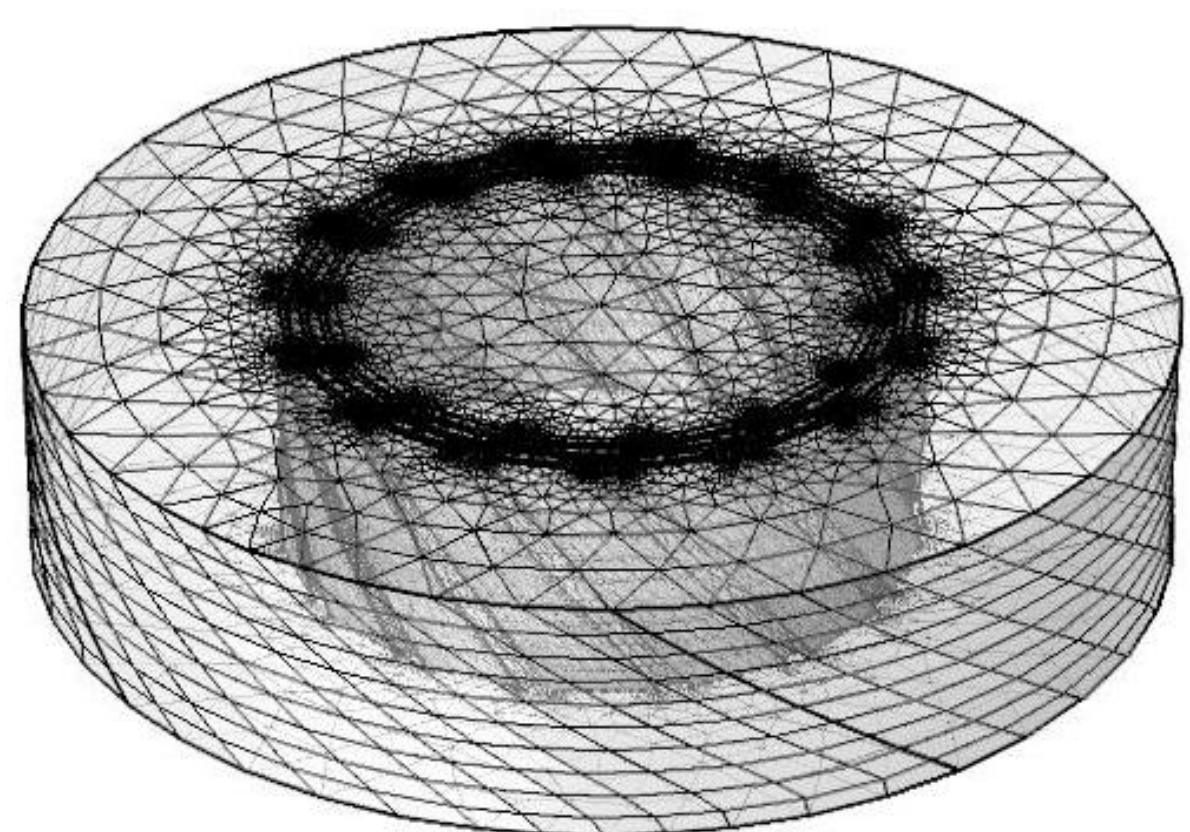


図3 メッシュモデル

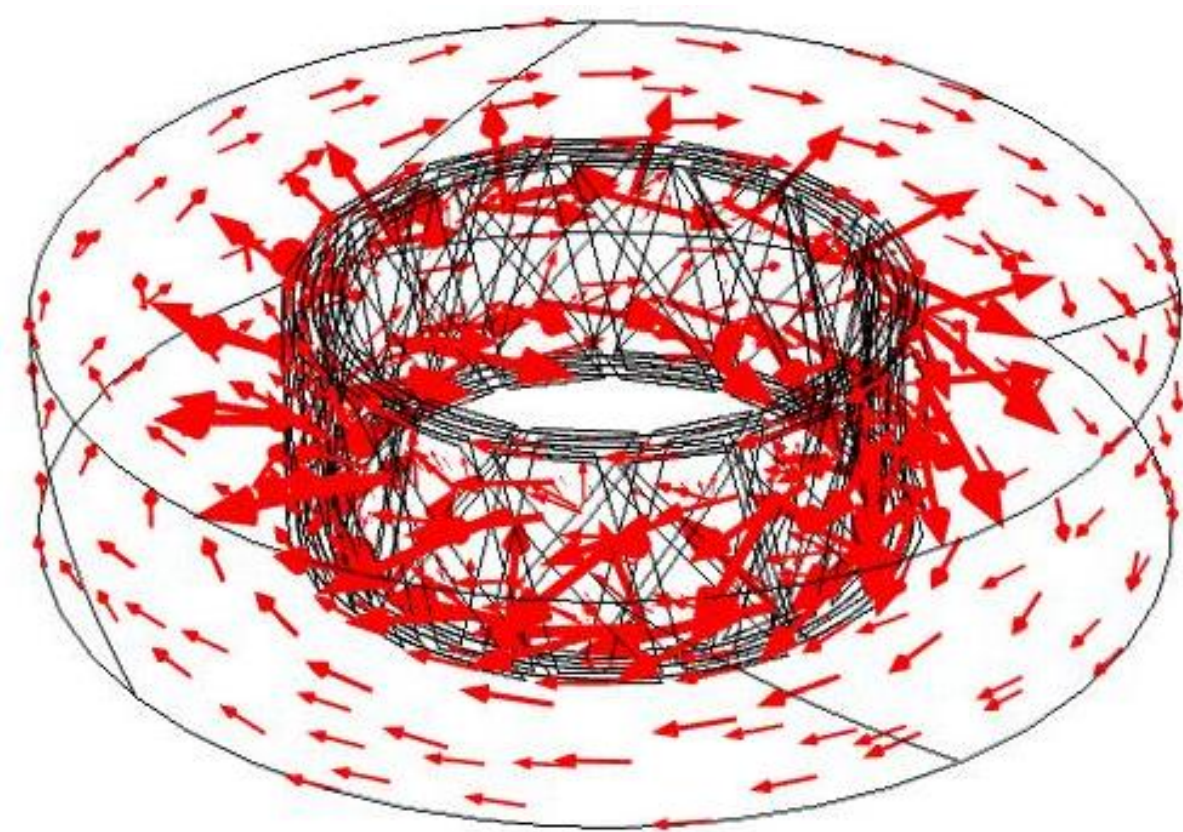


図4 磁界分布図

## ケーブルの構成

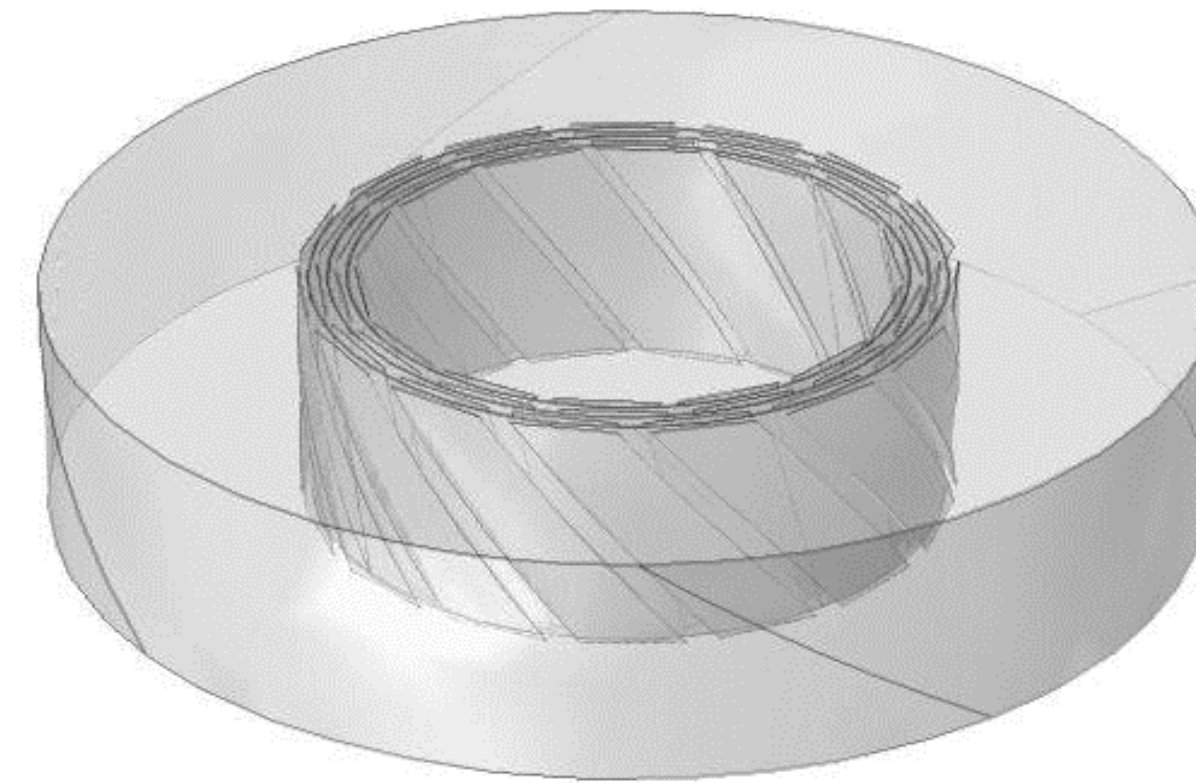
解析するケーブル : 4層REBCO超電導電力ケーブル

REBCO超電導体とは…

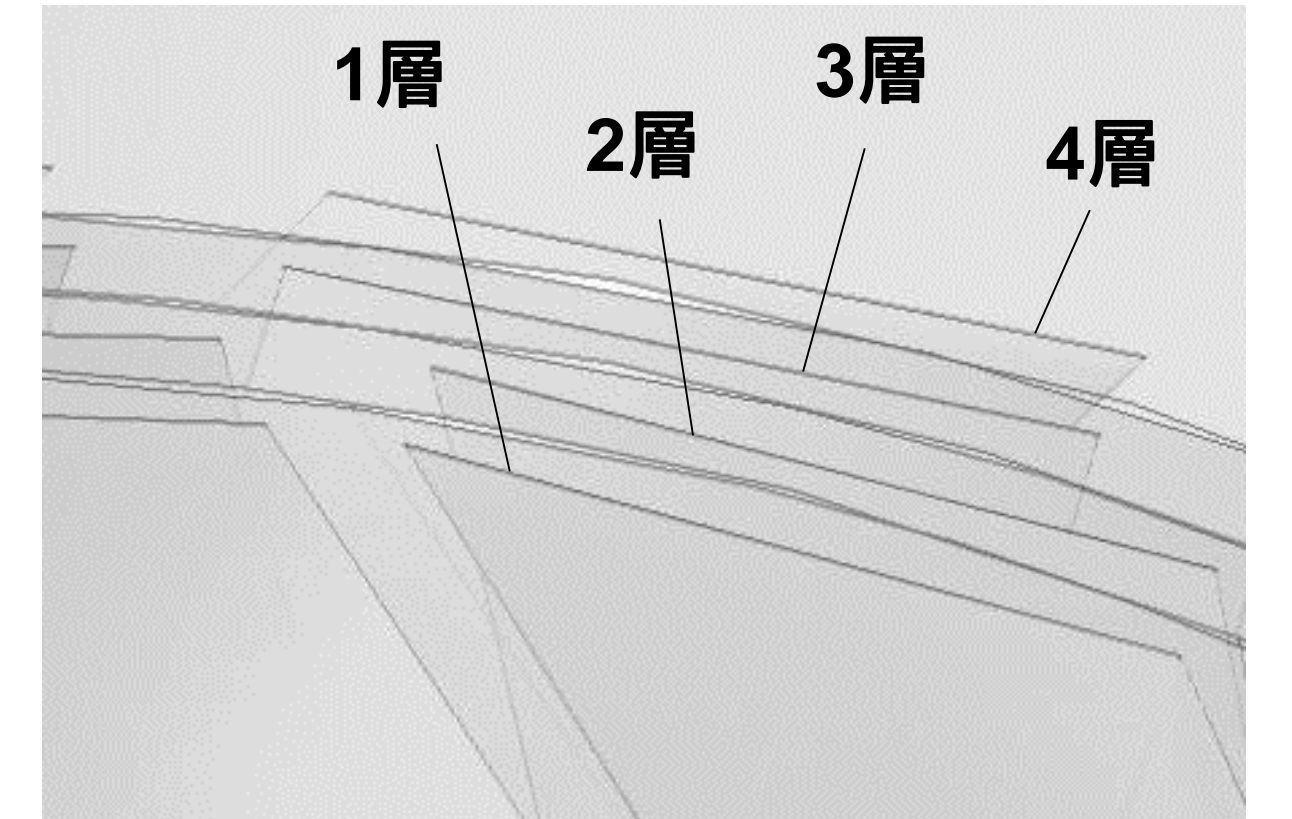
$REBa_2Cu_3O_y$  (RE: 希土類元素) で示される組成式をもつ高温超電導体の略称

本研究では一般的に作製されている4層導体+2層磁気シールドのREBCO超電導ケーブルの先行研究として、4層REBCO超電導電力ケーブルの解析を行う。

磁気シールドは、電流が逆方向に流れることで磁気遮蔽を実現するのに必要なものである。



(a) 全体図



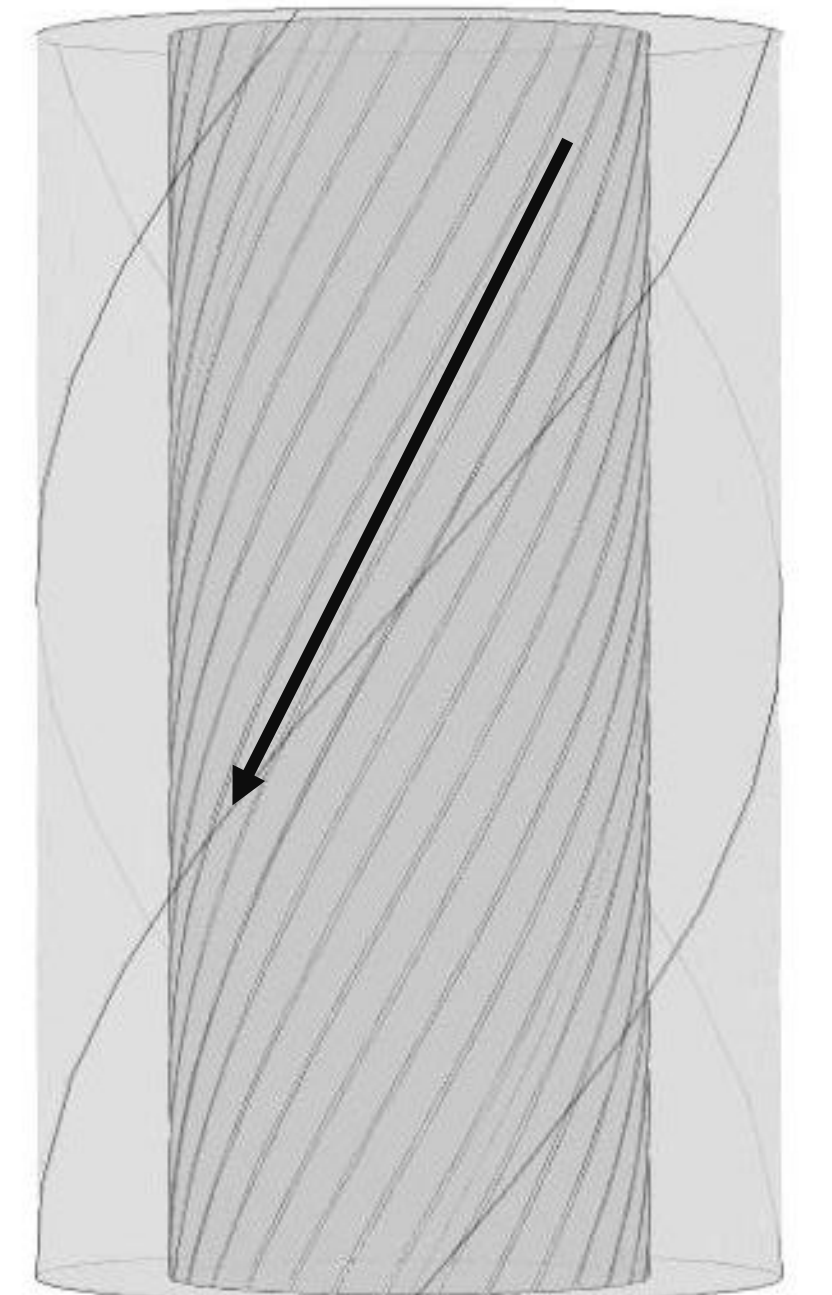
(b) 拡大図

図2 4層超電導REBCO超電導ケーブルの3次元モデル

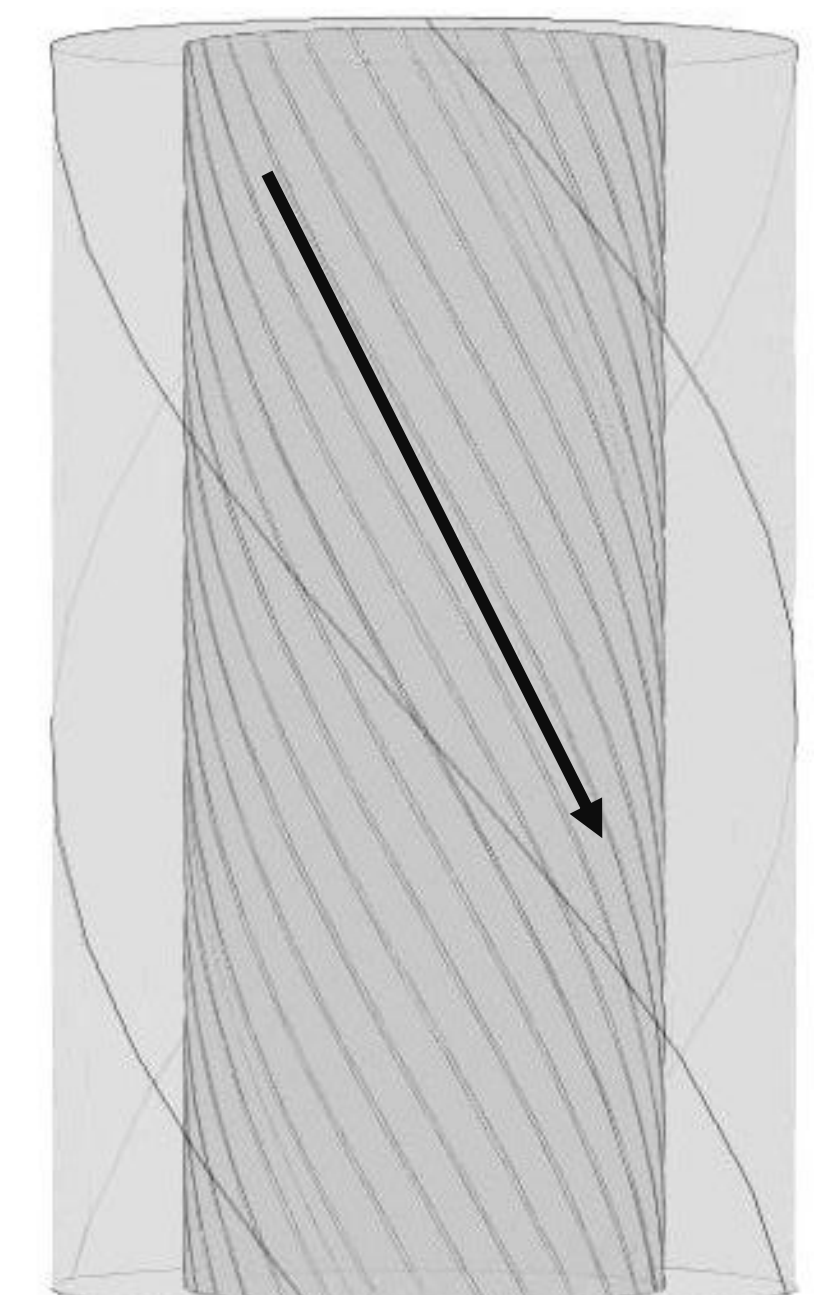
## ケーブルパラメータ

表1 4層REBCO超電導ケーブルの構成パラメータ

テープの幅	4 mm
テープの厚さ	1 $\mu$ m
1層目の内径	20.5 mm
2層目の内径	22.0 mm
3層目の内径	23.5 mm
4層目の内径	25.0 mm
1,2層目のテープ数	14
3,4層目のテープ数	15
全体の臨界電流	14 kA
テープ1枚当たりの臨界電流	240 A
1層目の巻き付けピッチ (巻き方向)	100 mm (S)
2層目の巻き付けピッチ (巻き方向)	310 mm (S)
3層目の巻き付けピッチ (巻き方向)	290 mm (Z)
4層目の巻き付けピッチ (巻き方向)	100 mm (Z)

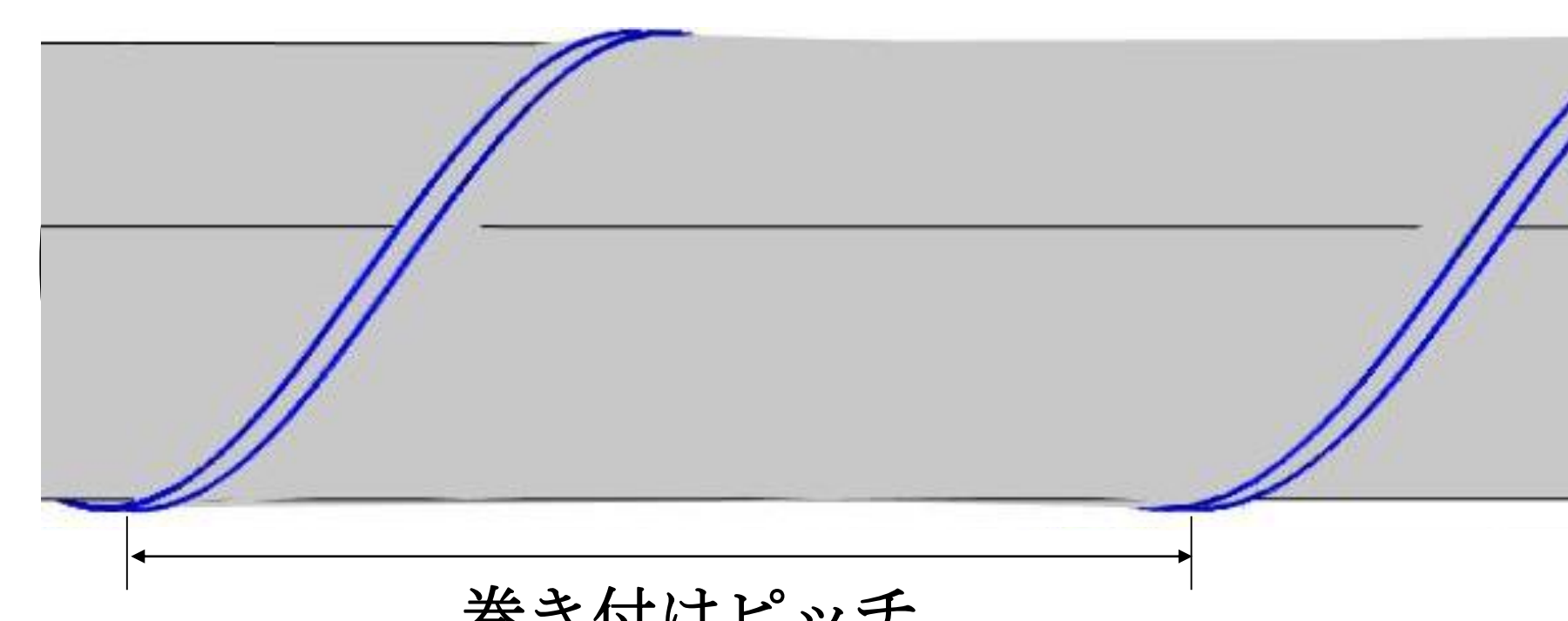


(a) S方向



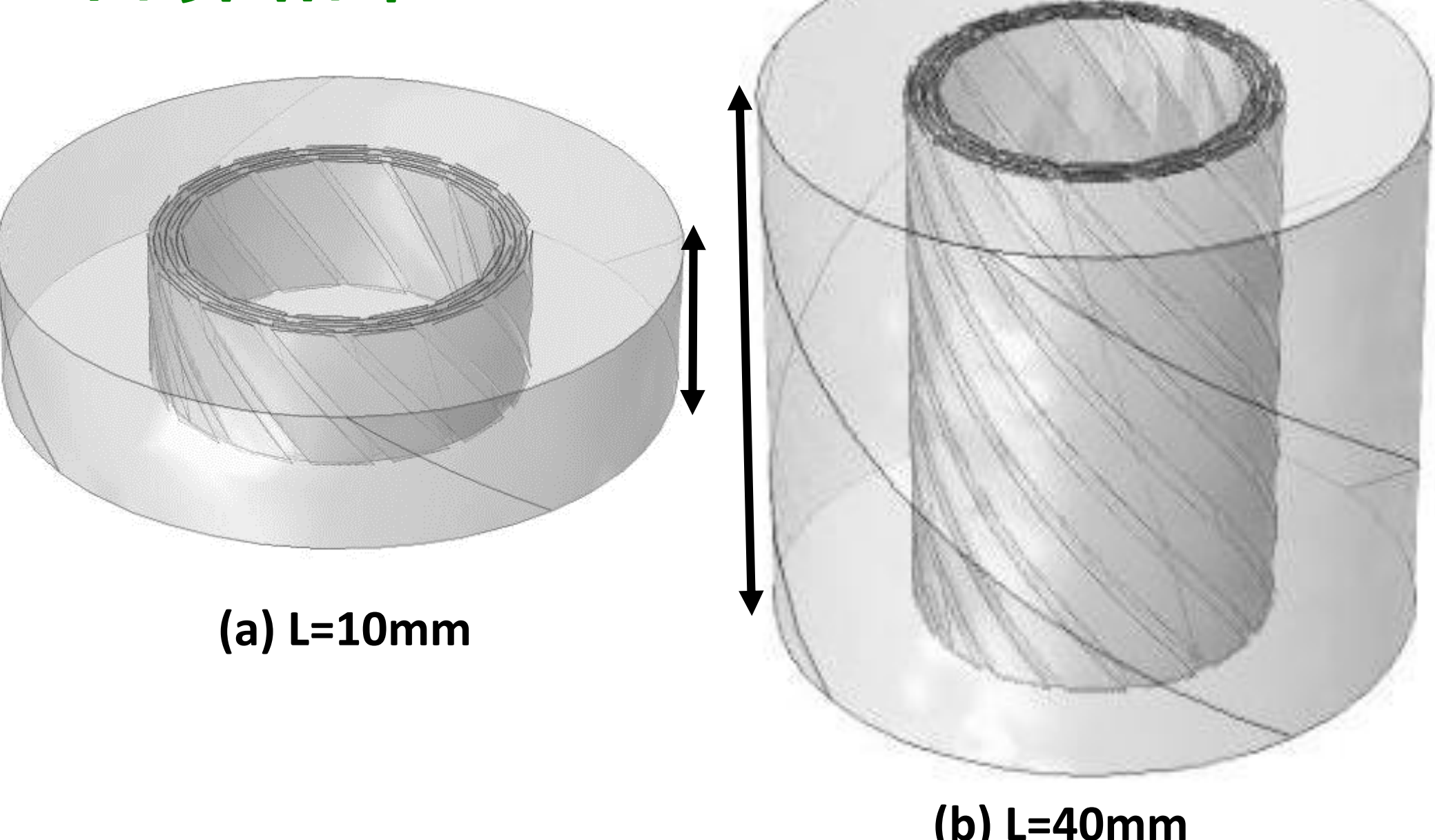
(b) Z方向

図6 螺旋の巻き方向



巻き付けピッチ  
図5 巻き付けピッチの説明図

## 計算結果



(a) L=10mm

(b) L=40mm

図7 シミュレートを行うケーブルモデル

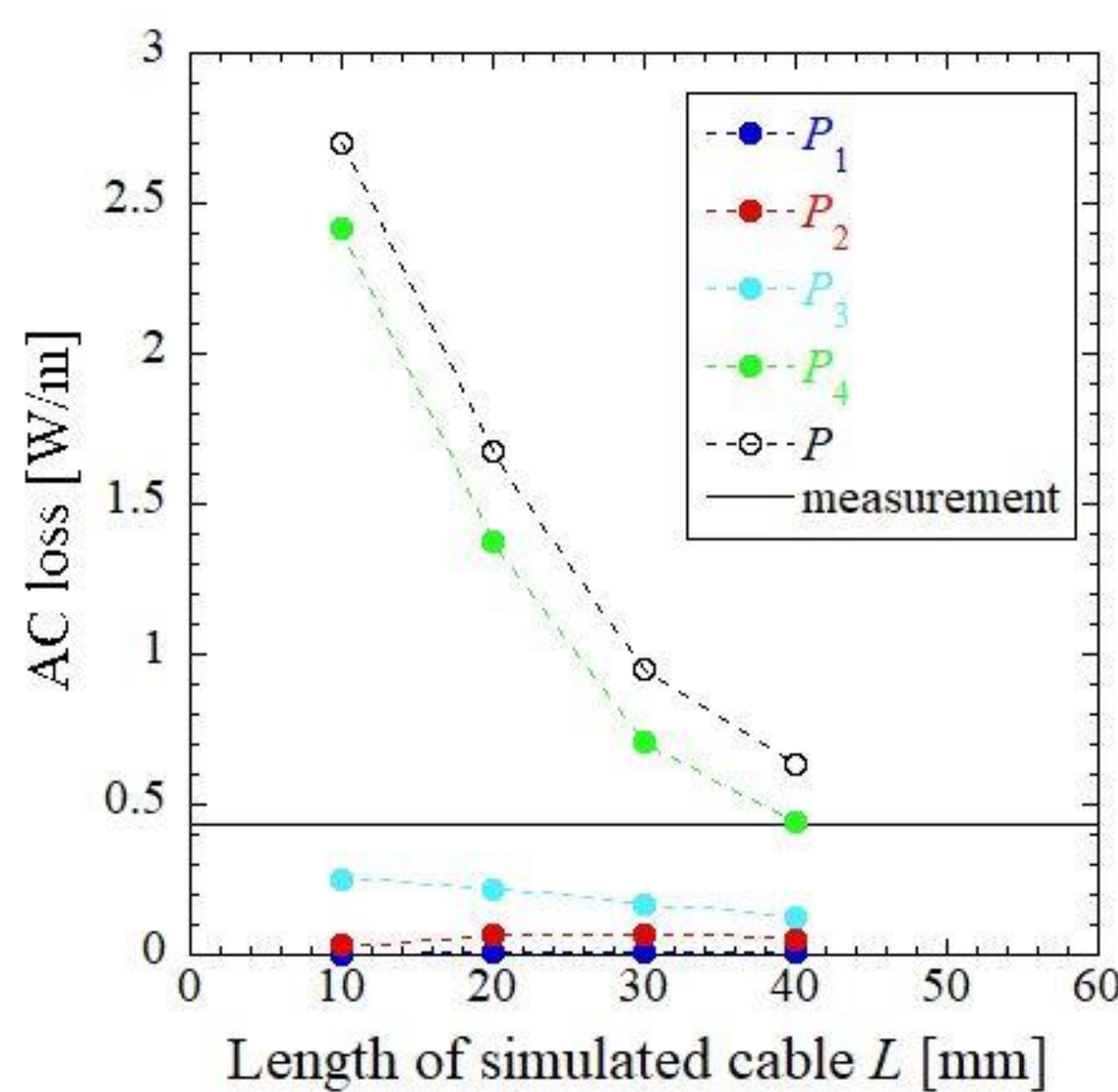


図8 モデルの長さに対する層損失特性[1]

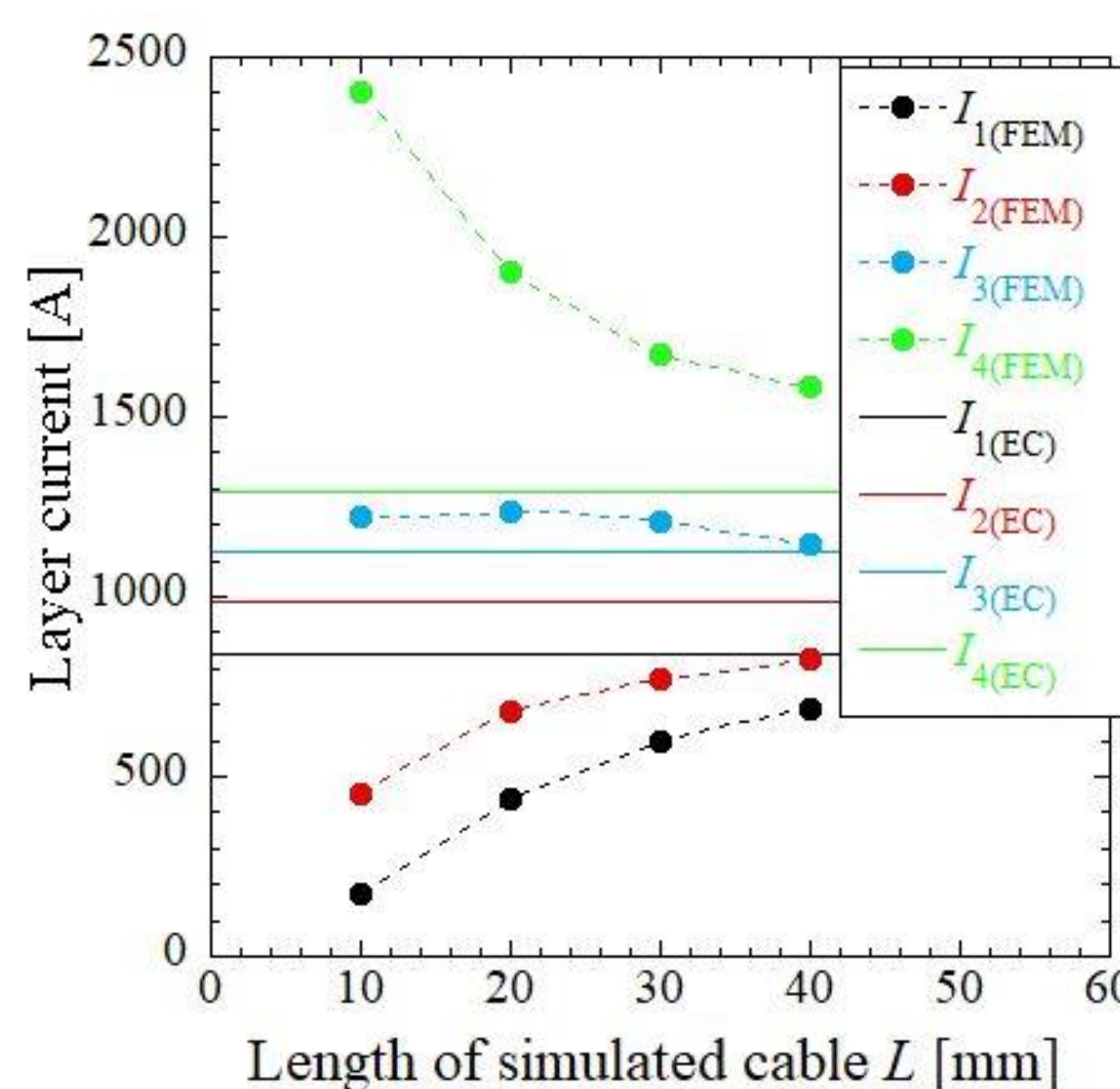


図9 モデルの長さに対する層電流特性

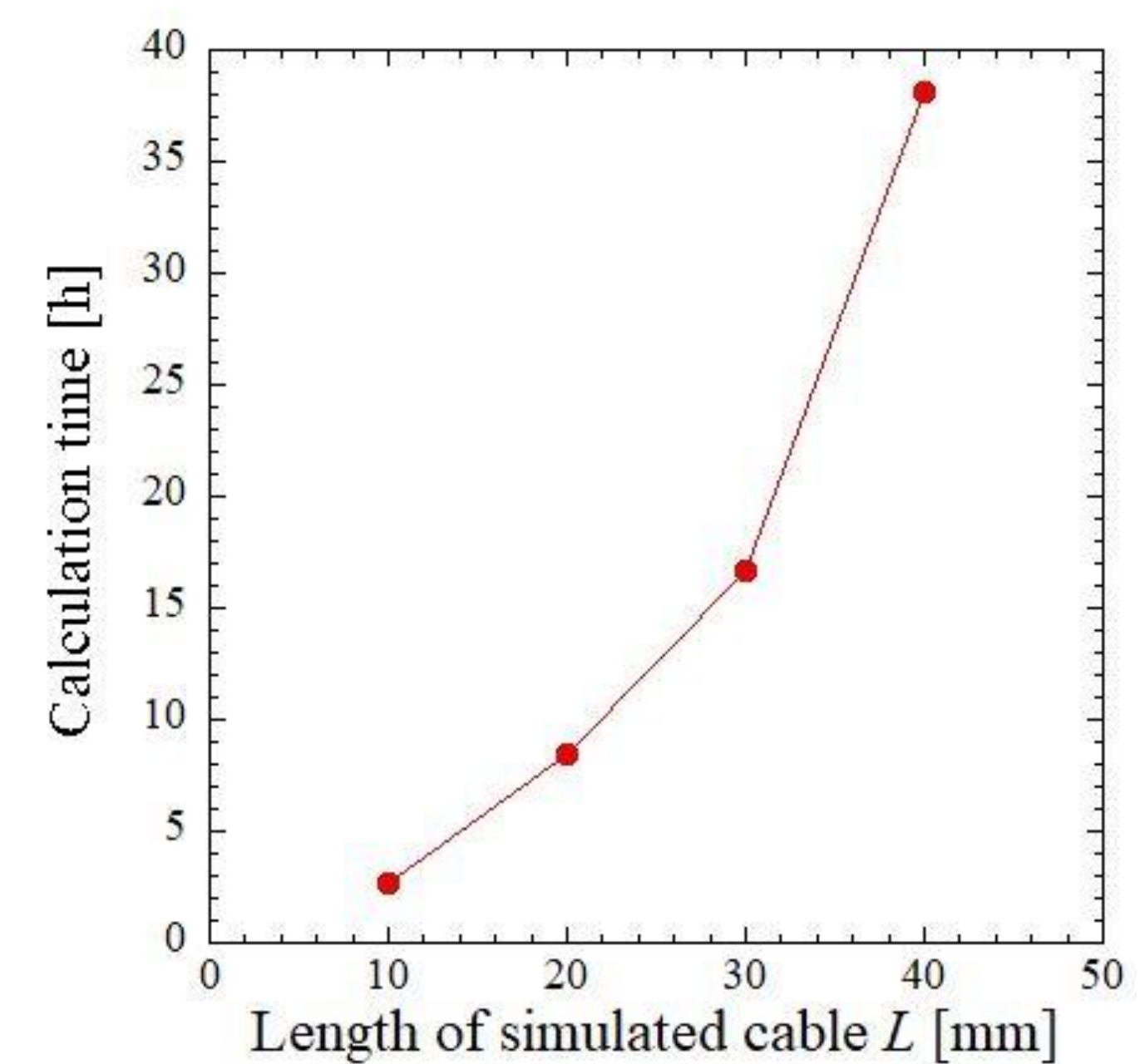


図10 モデルの長さに対する計算時間

## まとめ

超電導ケーブルの損失を正確に計算するためには、 $L \geq 40$  mmのケーブルモデルを作成する必要がある。しかし、 $L$ を長くするとメッシュ数が増加して計算時間が非常に長くなる。そのため、時間をかけずに正確な計算を行う方法を見つけ出すことを目指す必要がある。

## 参考文献

[1] M. Daibo, K. Watanabe, K. Akashi et al: Development of a 66 kV-5kA class HTS power cable with IBAD/PLD REBCO tapes, *Physics Procedia*, 58 (2014), 314-317.