

*T-A formulation* による  
超電導テープの交流損失計算

都城高専専攻科機械電気工学専攻 1年

○梯真翔 ・ 野地英樹

# 目次

1. 研究背景と目的
2. 研究方法
3. 結果と考察
4. まとめ

# 1. 研究背景と目的

超電導ケーブルの交流損失の低減を目的に *H formulation* という解析方法を用いて研究を進めている。

*H formulation* では計算時間が長くなり解析の効率が悪い。

*T-A formulation* を用いて解析を行い、計算時間の短縮を図る。

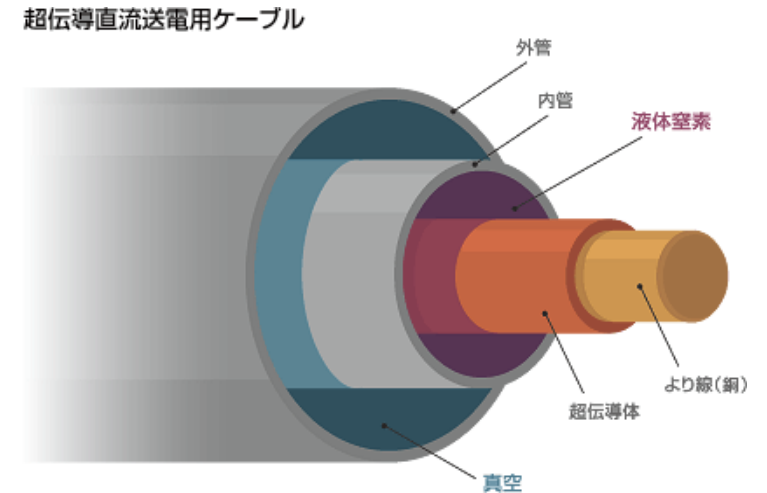
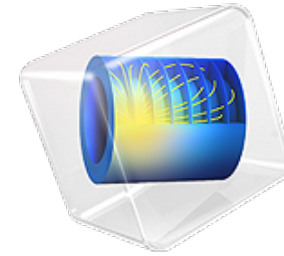


図1 超伝導ケーブルのイメージ図

## 2. 研究方法

COMSOL  
MULTIPHYSICS®



- COMSOL - 有限要素法を用いて様々な現象を解析することができるシミュレーションソフトウェア

## 2. 研究方法

- ・有限要素法

解析する領域やモデルを小領域に分割（メッシュ）し、その小領域ごとに計算を行い全体の解析結果を得る方法。

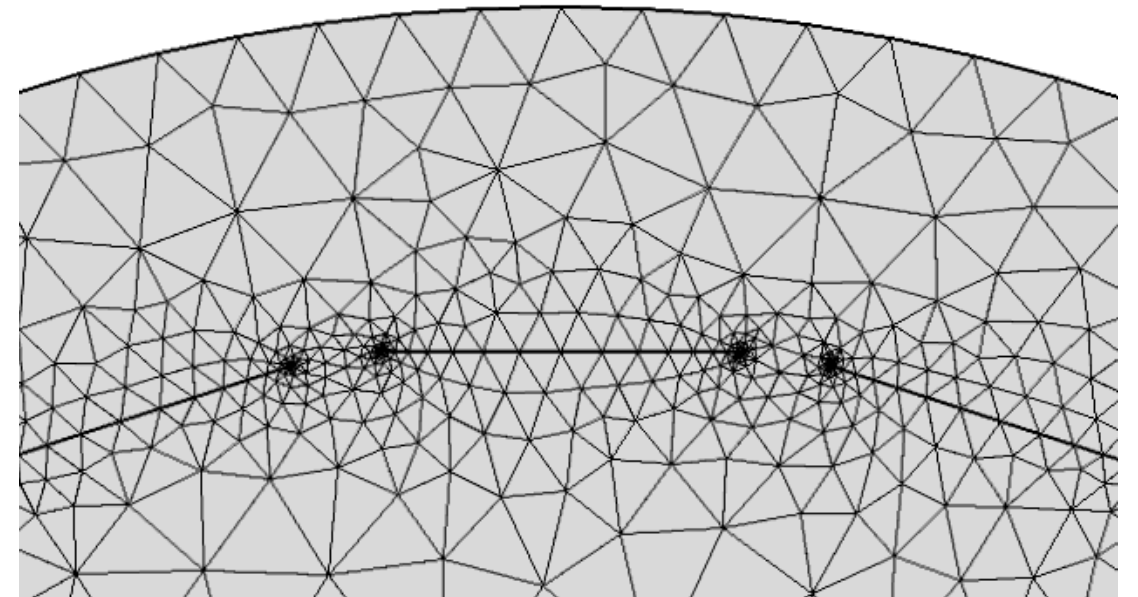


図2 ケーブルのメッシュ

## 2. 研究方法

### ○ *H formulation*と*T-A formulation*の違い

▪ *H formulation*

モデル全体  
磁場 $H$

▪ *T-A formulation*

超電導領域  
電流ベクトルポテンシャル $T$   
非超電導領域  
磁気ベクトルポテンシャル $A$

## 2. 研究方法

*T-A formulation* では超電導領域を一次元近似し、厚さのない線状にモデリング

超電導領域の幅 : 4 [mm]

非超電導領域の直径: 12 [mm]

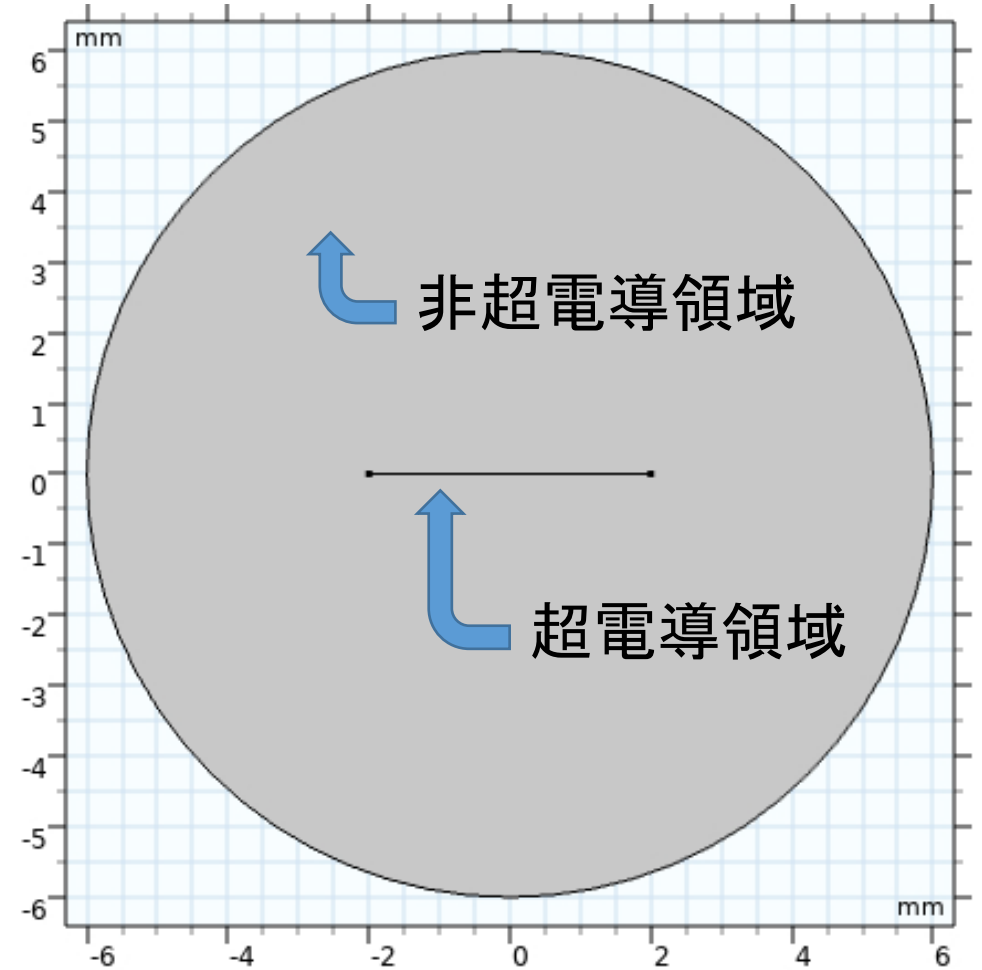


図3 T-A formulationの2次元モデル

## 2. 研究方法

### ▪ *T-A formulation*

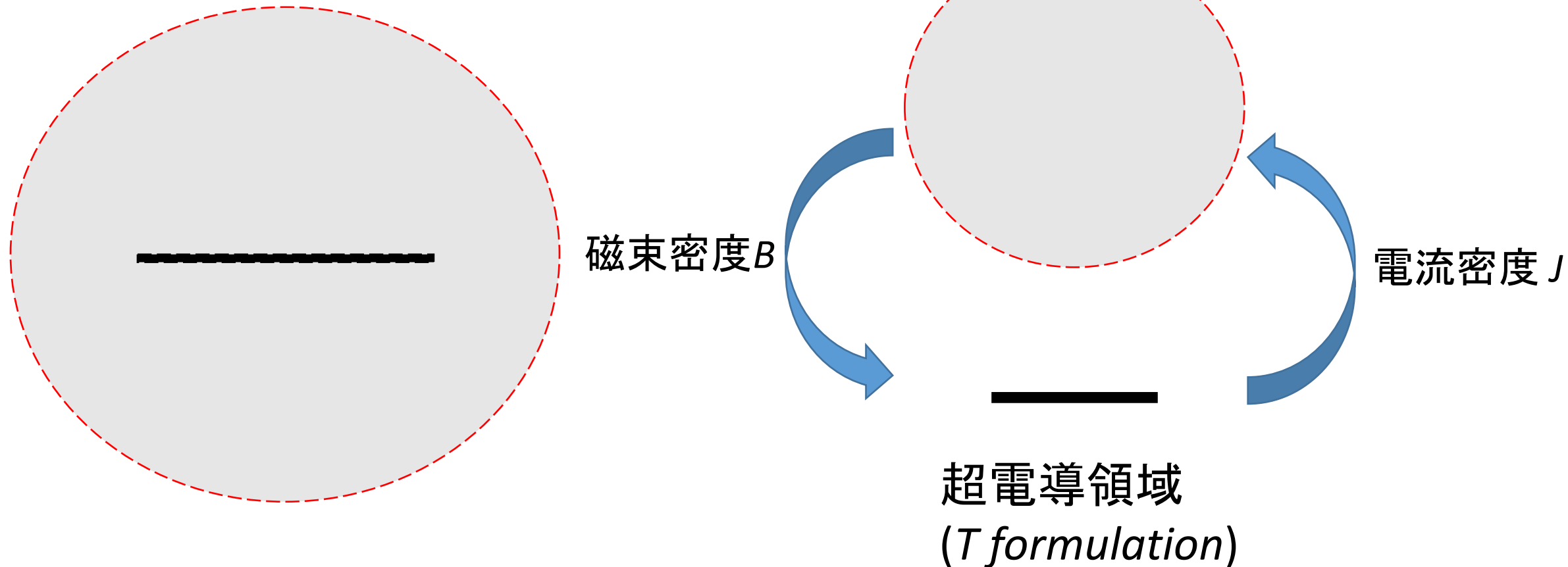


図4 T-A formulationの概略図



## 2. 研究方法

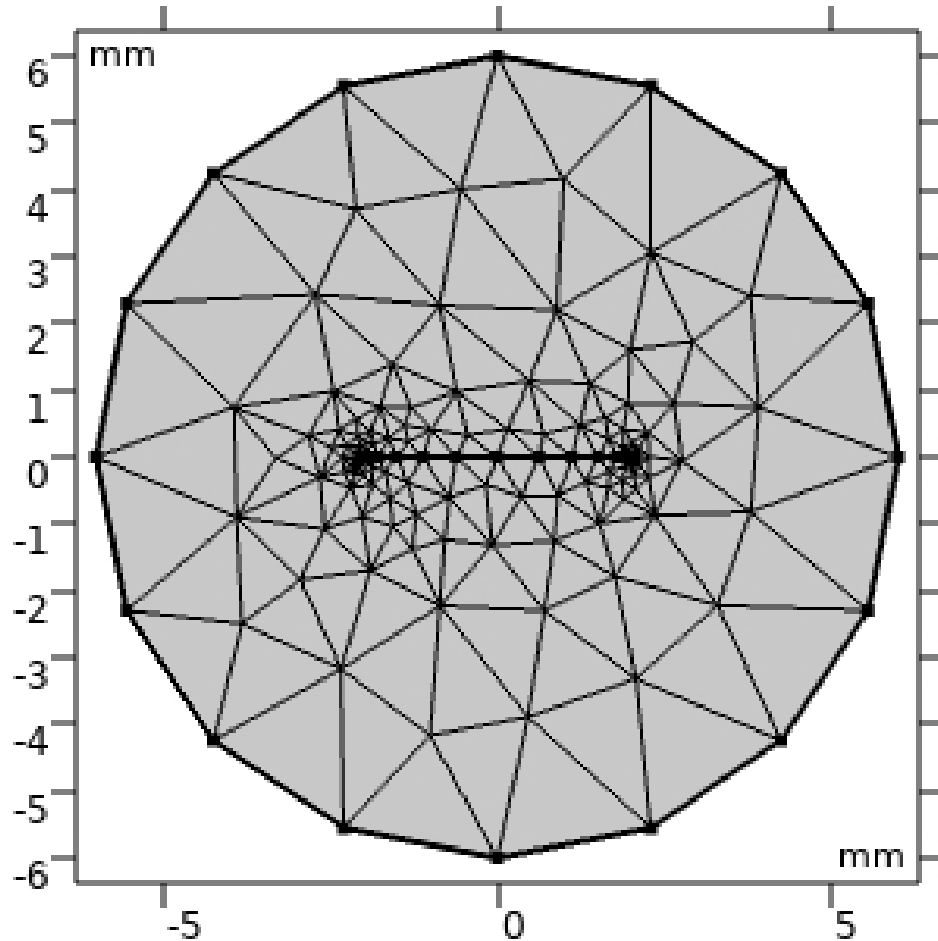


図5 T-A formulationのメッシュ図

- ・超電導領域

分割数 : 12

分割間隔 : 等差数列

- ・非超電導領域

三角形状に分割

## 2. 研究方法

- ①超電導テープに対して交流の垂直磁界を印加する
- ②超電導テープに対して交流電流を通電する

この2通りの場合の2次元電磁界解析を行った。

## 2. 研究方法

### ○超伝導領域で使用する方程式

- マクスウェル方程式 (*T formulation*)

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}, \quad \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{J}) = -\frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t}$$

- 超伝導固有の抵抗率の式

$$\rho = \frac{E_C}{J_C} \left( \frac{J}{J_C} \right)^{n-1}$$

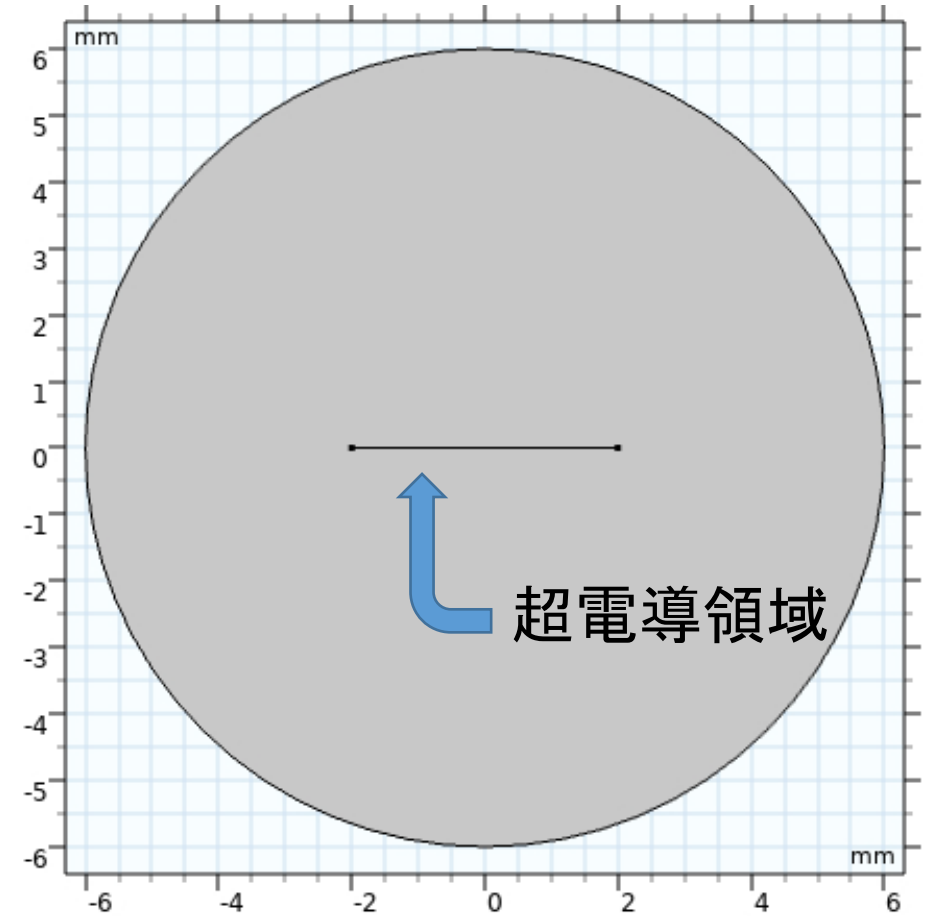


図6 T-A formulationの超伝導領域

## 2. 研究方法

### ○非超電導領域で使用する方程式

- アンペールの法則 (*A formulation*)

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

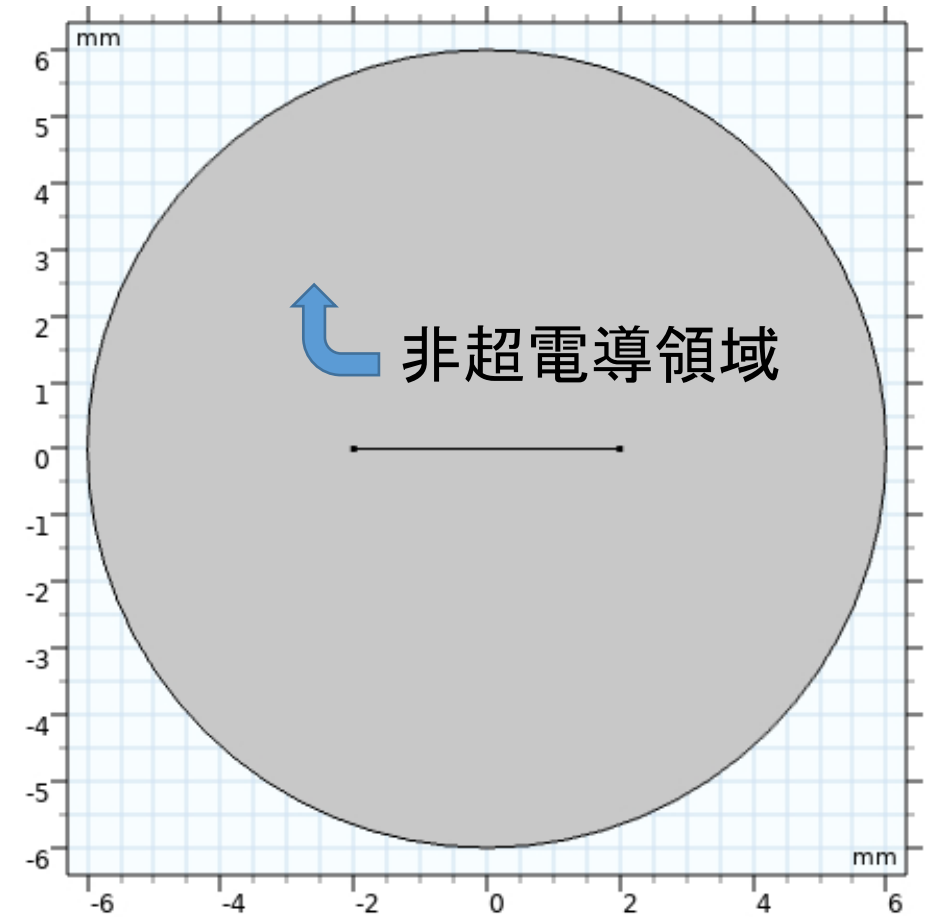


図7 T-A formulationの非超伝導領域

## 2. 研究方法

### ○交流損失の式

- 垂直磁界印加時の理論式 (*Brant*の式)

$$P_B = 4f\mu_0 \left(\frac{w}{2}\right)^2 J_C d H_0 \left\{ \left(\frac{2}{\alpha}\right) \ln(\cosh\alpha) - \tanh\alpha \right\}$$
$$\alpha = \frac{H_0}{H_C}, \quad H_C = \frac{J_C d}{\pi}$$

- 通電時の理論式 (*Norris*の式)

$$P_N = \frac{\mu_0 I_C^2 f}{\pi} \{ (1-i)\log(1-i) + (1+i)\log(1+i) - i^2 \}$$

- 超電導領域の交流損失の計算式

$$P = f \cdot \int_{\frac{1}{f}} dt \int_S (E \cdot J) dS$$

### 3. 結果と考察

- ①超電導テープに対して交流の垂直磁界を印加したとき
- ②超電導テープに交流電流を通電したとき

### 3. 結果と考察

#### ①超電導テープに対して交流の垂直磁界を印加したとき

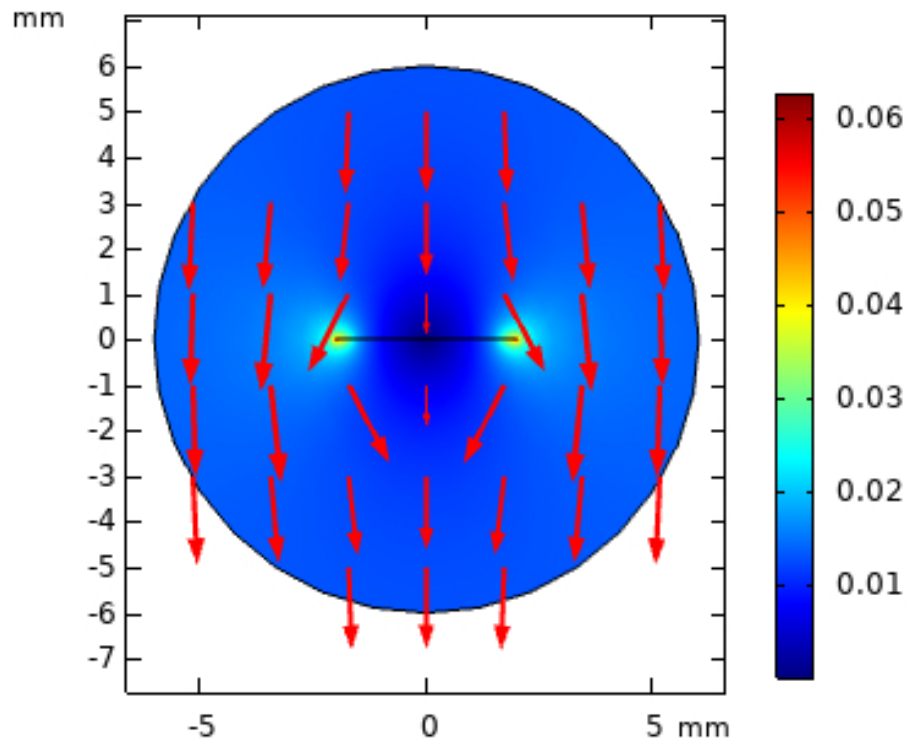


図8 垂直磁界印加時の磁界分布

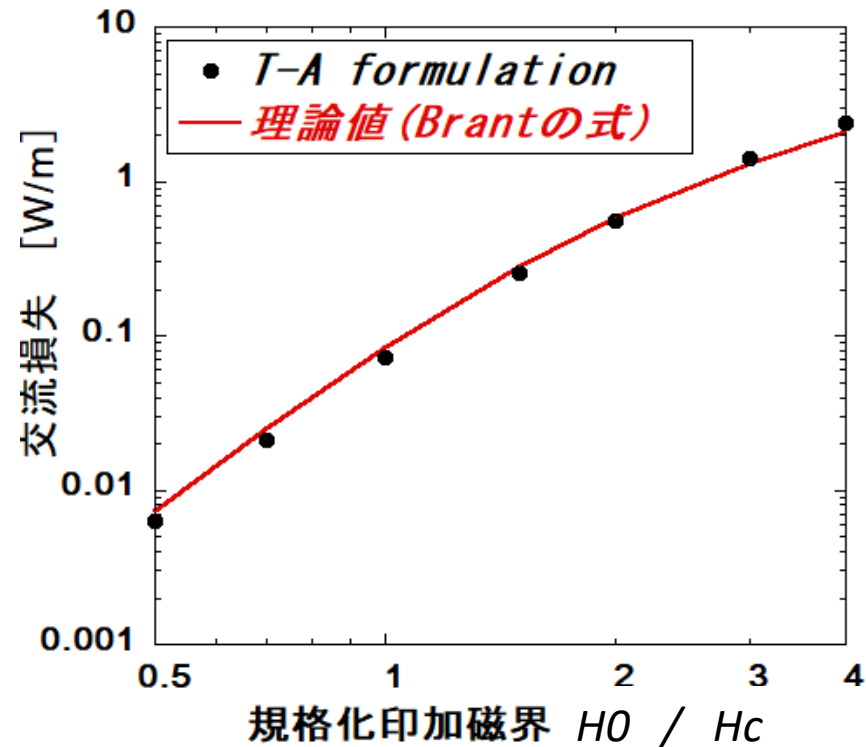


図9 垂直磁界印加時の交流損失特性

### 3. 結果と考察

#### ②超電導テープに交流電流を通電したとき

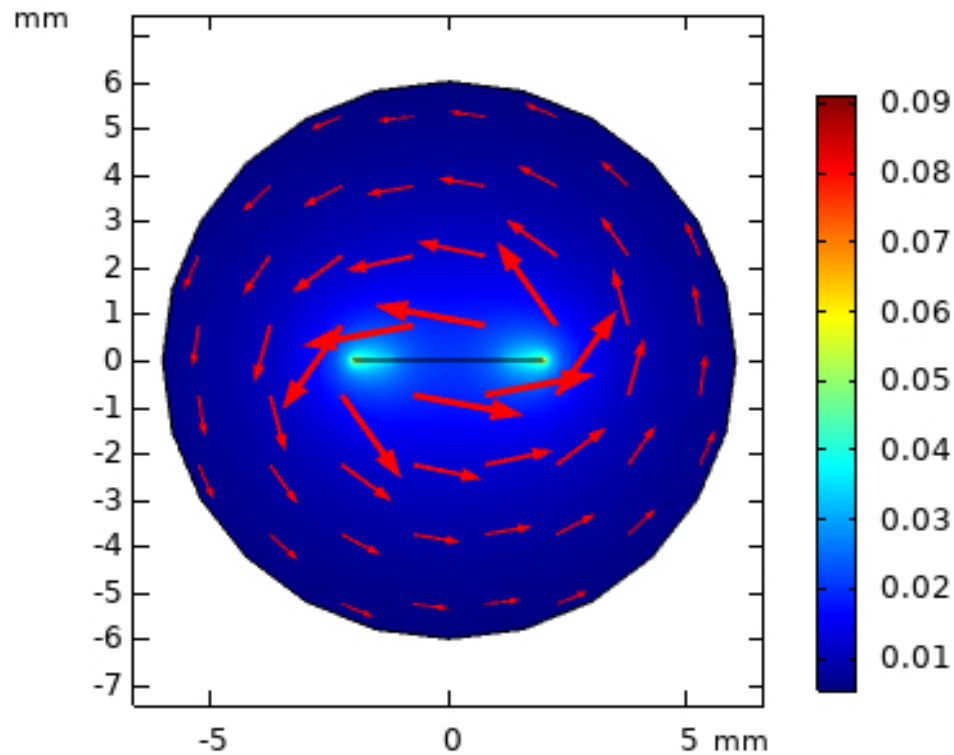


図10 交流電流通電時の磁界分布

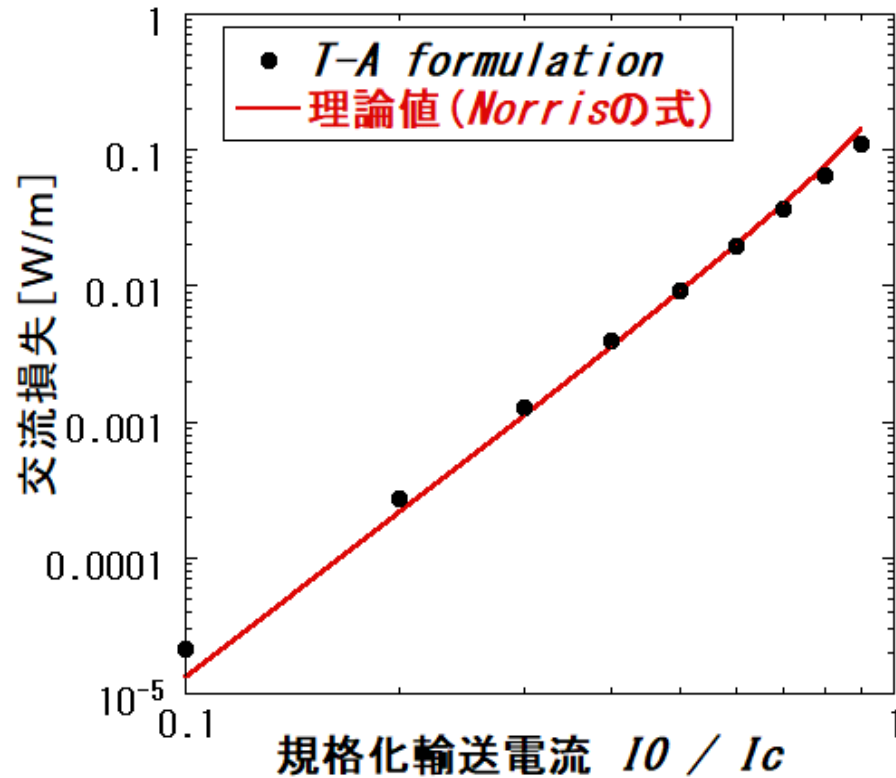


図11 交流電流通電時の交流損失特性

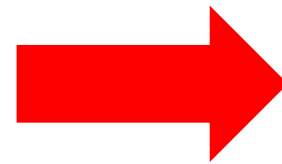


### 3. 結果と考察

#### ○ 計算時間の比較

▪ *H formulation*

30秒



1/6倍

▪ *T-A formulation*

5秒

## 4. まとめ

- 超電導テープ単体に対して、垂直磁界印加時と電流通電時の2次元電磁界解析の結果である磁界分布を描き、交流損失を計算することに成功した。
- 交流損失の計算値は、理論値とほぼ一致した。
- 計算時間の短縮が確認できた。
- 今後は、*T-A formulation* を導入した3次元電磁界解析を目指す。

ご清聴ありがとうございました