

# T-A formulation による超電導テープの 2 次元電磁界解析

都城工業高等専門学校 機械電気工学専攻 梯真翔 野地英樹

**概要**：本研究では、超電導体の電磁界解析にかかる計算時間を短縮するため、 $H$  formulation の代わりに  $T-A$  formulation を導入し、交流損失の計算値と理論値を比較した。超電導テープ単体の 2 次元モデルにおいて、超電導領域は 1 次元近似し、かつ電流ベクトルポテンシャル  $T$  によって計算した。また、非超電導領域（空気）は磁気ベクトルポテンシャル  $A$  によって計算し、分離することによって高速化を図った。超電導テープに対して垂直磁界印加時と、通電時の 2 次元電磁界解析をそれぞれ行った結果、計算値は理論値と一致することが分かった。

## 計算方法

### 超伝導領域で使用する方程式

- マクスウェル方程式 ( $T$  formulation)

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

- 超電導固有の抵抗率の式

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

### 非超伝導領域で使用する方程式

- アンペールの法則 ( $A$  formulation)

$$J = \nabla \times H, \quad B = \nabla \times A$$

### 交流損失の式

- 超電導領域の交流損失の計算式

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

- 垂直磁界印加時の理論式 (Brant の式)

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

$$\alpha = \frac{H_a}{H_C}, \quad H_C = \frac{J_C d}{\pi}$$

- 通電時の理論式 (Norris の式)

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

## 計算結果及び考察

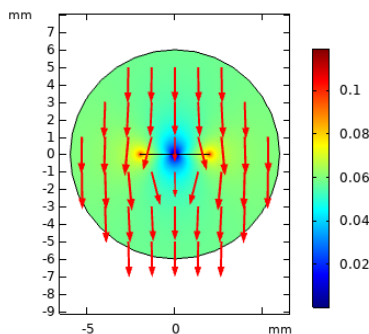


図 1 垂直磁界印加時の磁界分布

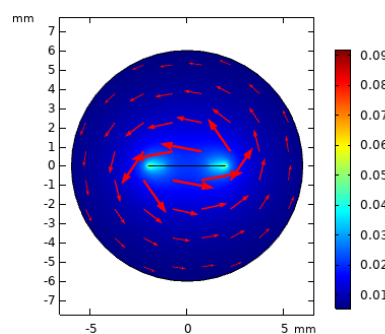


図 3 電流通電時の磁界分布

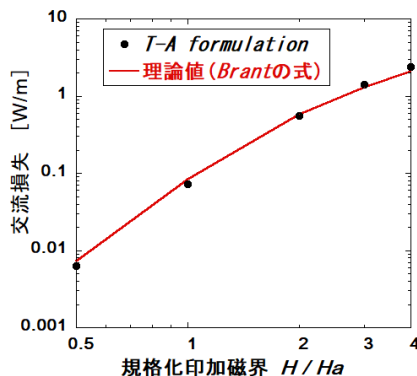


図 2 垂直磁界印加時の交流損失特性

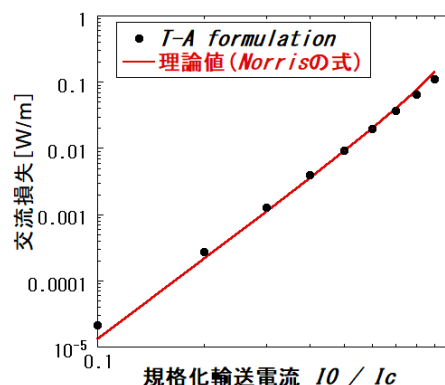


図 4 電流通電時の交流損失特性

### 結果の考察

超電導テープ単体に対して、垂直磁界印加時と通電時の境界条件を適切に設定することで、2 次元電磁界解析の結果である磁界分布を描くことに成功した。

図 3 および図 4 より、交流損失の計算値は、理論値とほぼ一致した。

図 4 において、規格化輸送電流が小さいときの計算値と理論値のずれは、超電導領域の分割数を増やすことで改善されることが分かった。

**まとめ**：本研究の結果、 $T-A$  formulation を導入した 2 次元電磁界解析により、交流損失を正しく計算できることを確認した。今後は、 $T-A$  formulation を導入した 3 次元電磁界解析を目指す。