

# 2層REBCO超電導電力ケーブルの交流損失特性の研究

都城工業高等専門学校 専攻科 機械電気工学専攻

岡留 諒, 野地 英樹

## 概要

本研究では、汎用ソフトCOMSOLを用いて3次元電磁界解析を行い、損失の計算値を古河電工(株)が作製した2層REBCO超電導ケーブルの損失の測定値と比較した。その結果、計算値は測定値と一致した。また、解析に使用するケーブルモデルの長さが長いほど計算結果は実験値に近づくことが分かった。さらに、このケーブルの損失低減法として先行研究により提案されていた方法を試みて、その効果を検証した。すなわち、超電導テープの巻方向を各層でSSとし、超電導テープの層間の相対位置がtape-on-gapとなるように配置して、1層目と2層目の螺旋ピッチを同一としたまま変化させた。このときの損失を計算した結果、巻き付けピッチがない場合に損失が最小となり、その最小値は測定値より大きくなり、損失低減効果がないことが分かった。

## 研究背景と目的

### 超電導とは...

特定の物質を非常に低い温度に冷却すると、ある温度で電気抵抗がゼロになる現象。

→ 送電の分野に応用できる

### 従来の送電ケーブルの問題点

・電気抵抗により、発電量の約5%が損失

### 超電導ケーブルの利点

・送電時の電力損失を削減  
・大容量でコンパクトであり、地中化が容易

### 超電導ケーブルの問題点

超電導ケーブルに交流電流を流すと損失が発生する(電流が作る磁界の向きが頻繁に変化するため)

超電導ケーブルに流すと...

直流電流 → 損失ゼロ  
交流電流 → 損失が発生

### 研究の目的

超電導ケーブルの実現に向け、交流損失を低減する(低損失ケーブルの設計)

## 計算方法

研究の対象：2層REBCO超電導ケーブル

3次元電磁界解析によって、超伝導ケーブルに交流電流を流したときの電磁界をCOMSOLで3次元的に解析する。

### REBCOとは...

REBa2CuOy(REは希土類元素)で表される銅酸化物超電導体

### COMSOLとは...

有限要素法を使用してモデルを解析するソフトウェア

### 有限要素法による解析の流れ

モデルを要素に分割 → 各要素を解析 → 全体の分析結果を近似

## 超電導ケーブルの構成

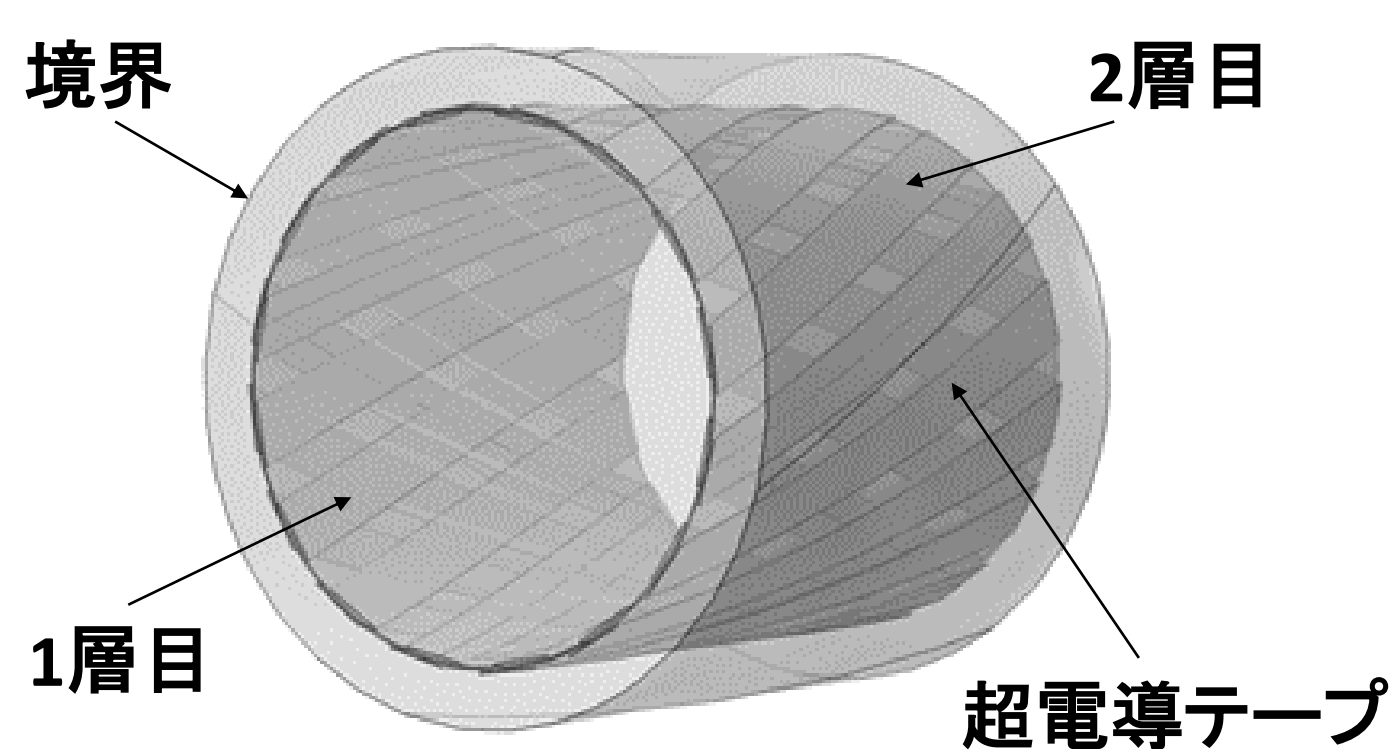


図1. 2層REBCO超電導ケーブルの3Dモデル

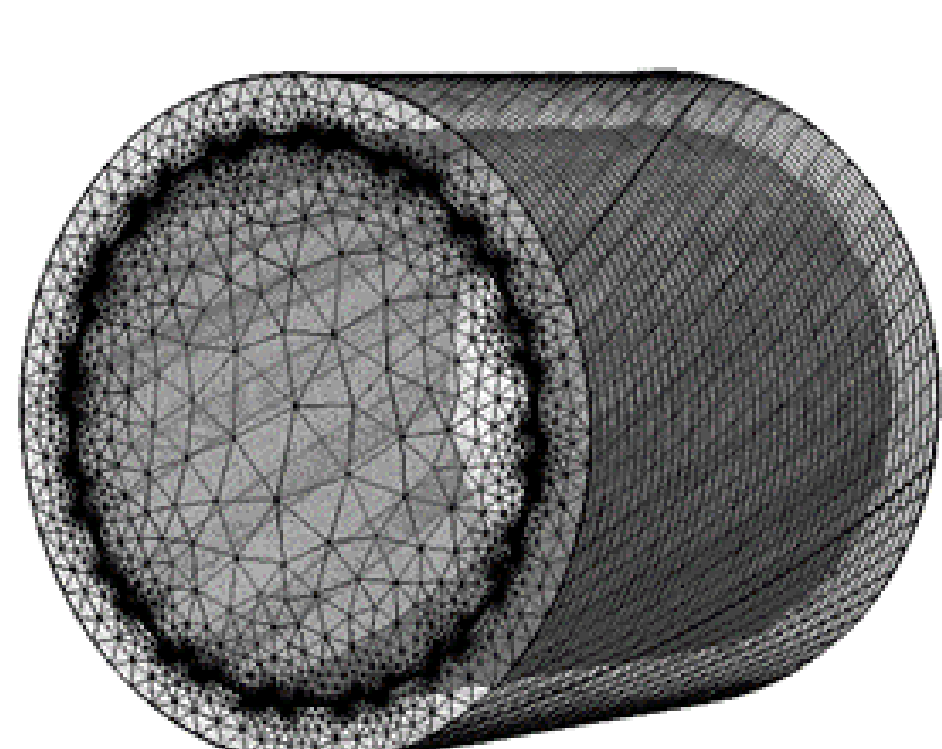


図2. 有限要素法のメッシュ

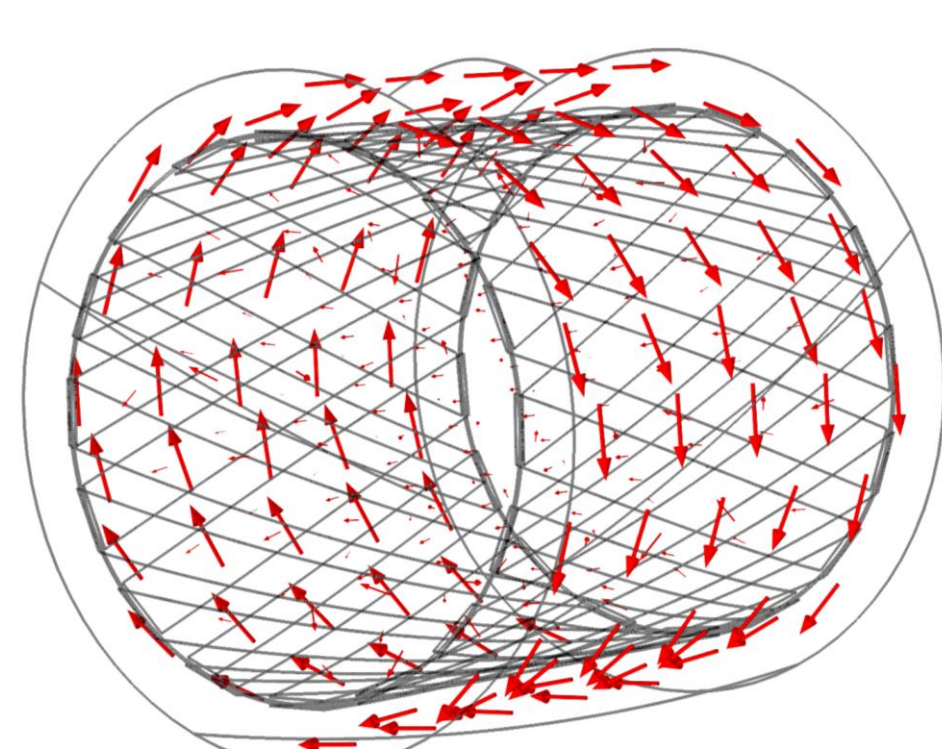


図3. 超電導ケーブルの電磁界

表1. 2層REBCO超電導ケーブルのパラメータ

|                  |            |
|------------------|------------|
| テープ幅             | 4 mm       |
| テープの厚さ           | 1 μm       |
| 超電導ケーブルの1層目半径    | 16.0 mm    |
| 超電導ケーブルの2層目半径    | 16.5 mm    |
| 各層のテープ枚数         | 16 枚       |
| テープ1枚の臨界電流 $I_c$ | 45.6 A     |
| 1層目の螺旋ピッチ $HP_1$ | 340 mm (S) |
| 2層目の螺旋ピッチ $HP_2$ | 280 mm (Z) |

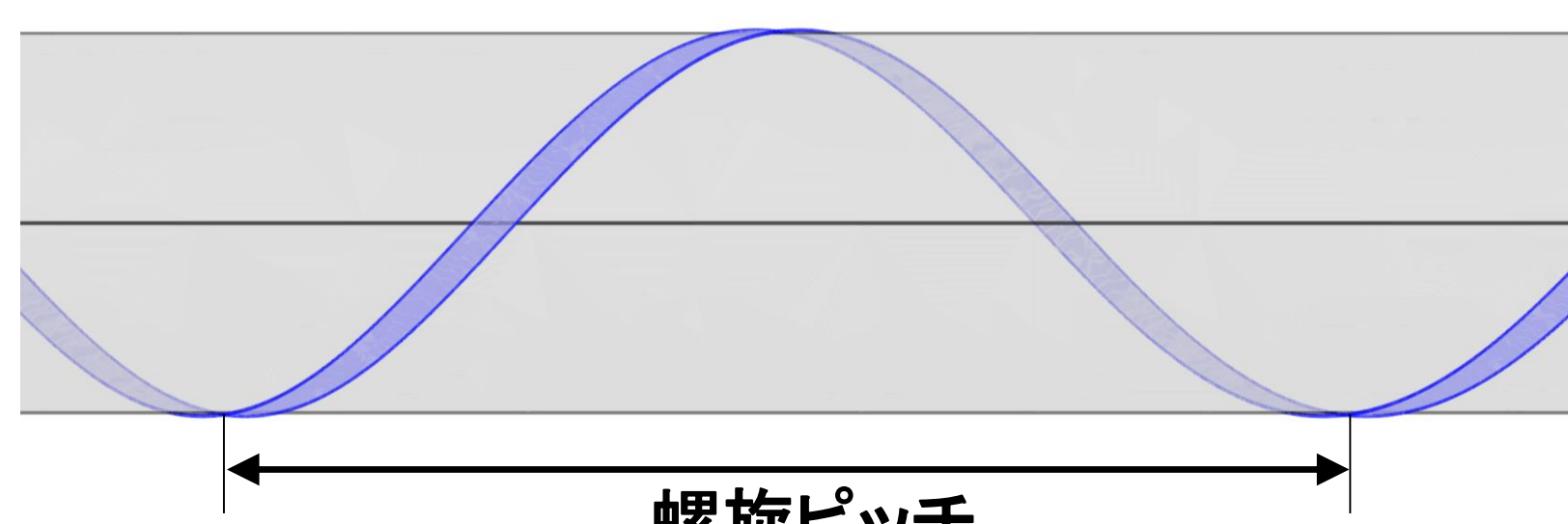


図4. 螺旋ピッチの説明

## 解析に用いる式

### ファラデーの法則(基本式)

$$\mu_0 \left[ \frac{\partial H_x}{\partial t}, \frac{\partial H_y}{\partial t}, \frac{\partial H_z}{\partial t} \right] + \left[ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right] = 0$$

### アンペールの法則(境界条件)

$$[J_x, J_y, J_z] = \left[ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}, \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}, \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right]$$

### 抵抗率の式

$$[\rho_{scx}, \rho_{scy}, \rho_{scz}] = \left[ \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{J_x}{J_c} \right)^{n-1}, \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{J_y}{J_c} \right)^{n-1}, \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{J_z}{J_c} \right)^{n-1} \right]$$

### オームの法則

$$[E_x, E_y, E_z] = [\rho_{scx} J_x, \rho_{scy} J_y, \rho_{scz} J_z]$$

### 交流損失の式

$$P = \frac{f}{L} \cdot \int_1^T dt \int_V (E_x J_x + E_y J_y + E_z J_z) dV \quad [W/m]$$

## SZモデルの計算結果

各層の巻付け方向が異なるSZ巻きの2層ケーブルの損失計算を行った。

**Measurement**  
... 古河電工の測定値<sup>[1]</sup>

**Calculation**  
... COMSOLの計算値

$P_1$ ... 1層目の交流損失  
 $P_2$ ... 2層目の交流損失  
 $P$ ... 全体の交流損失

$I_1$ ... 1層目の通電電流  
 $I_2$ ... 2層目の通電電流

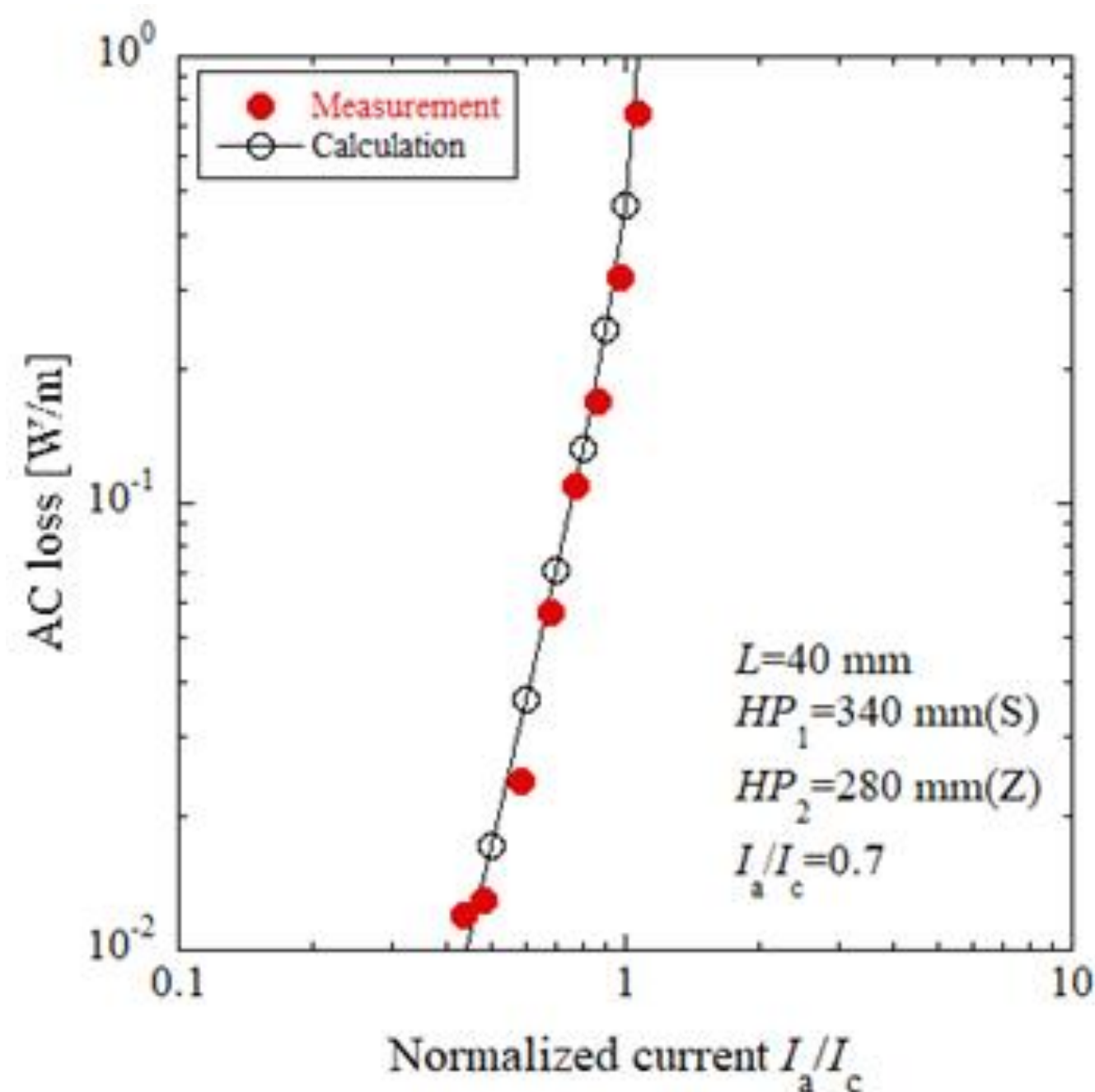


図5. 電流に対する交流損失特性

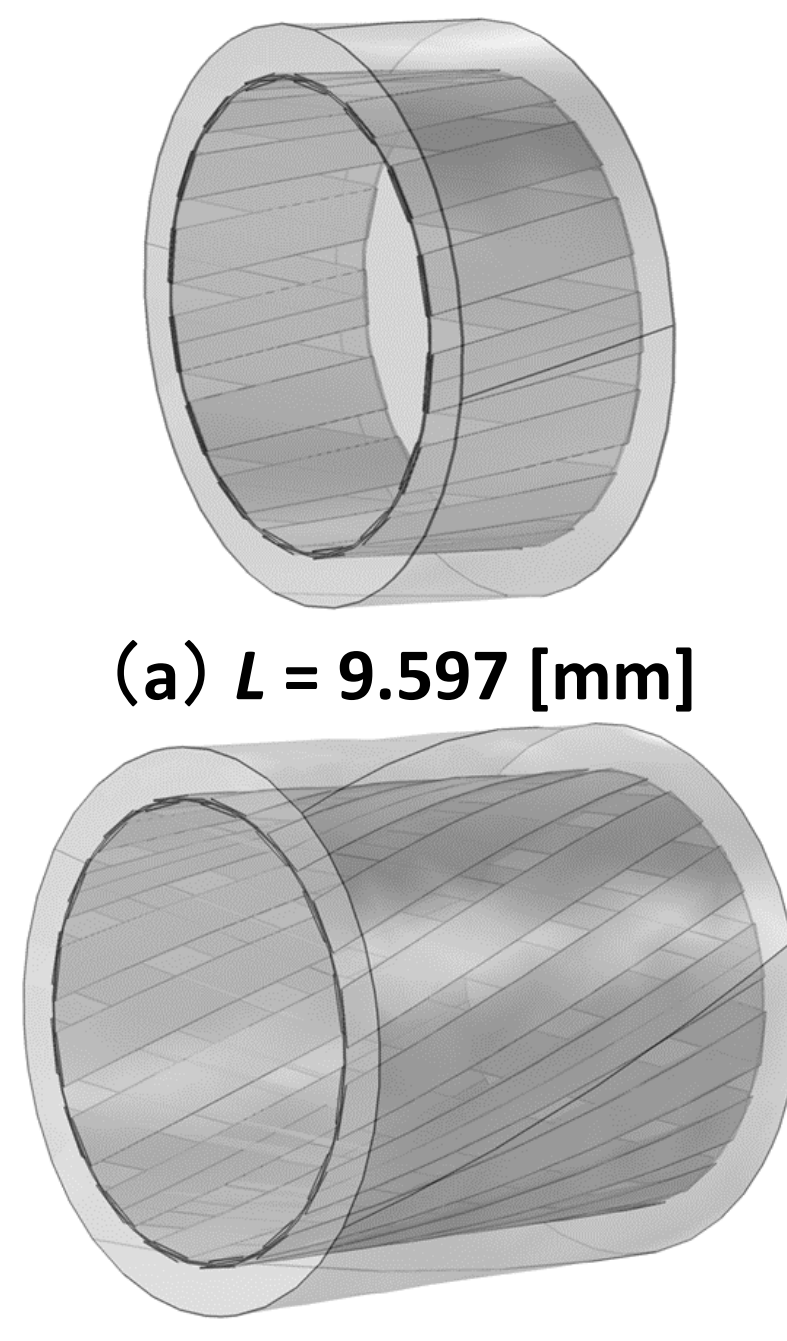
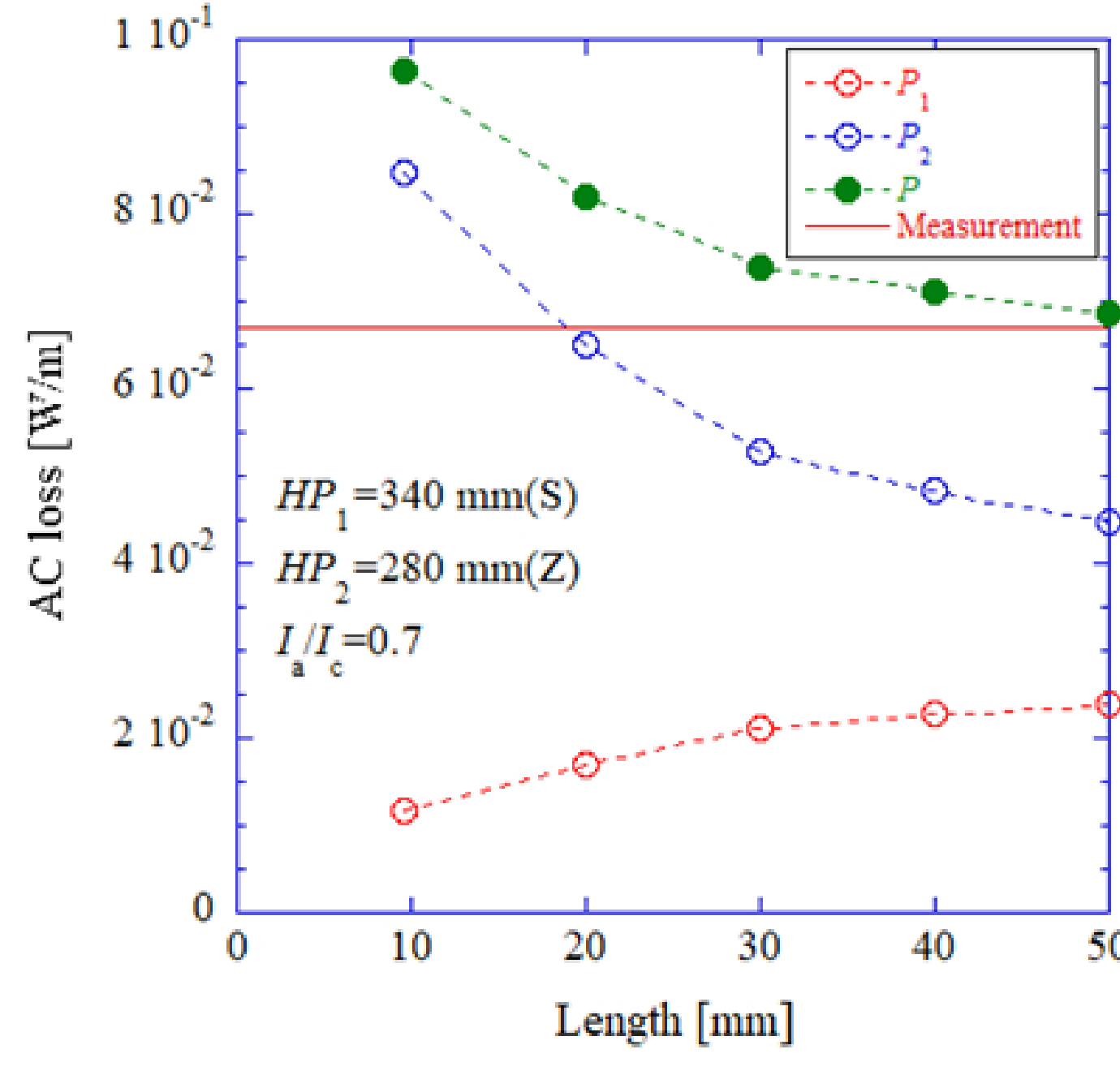
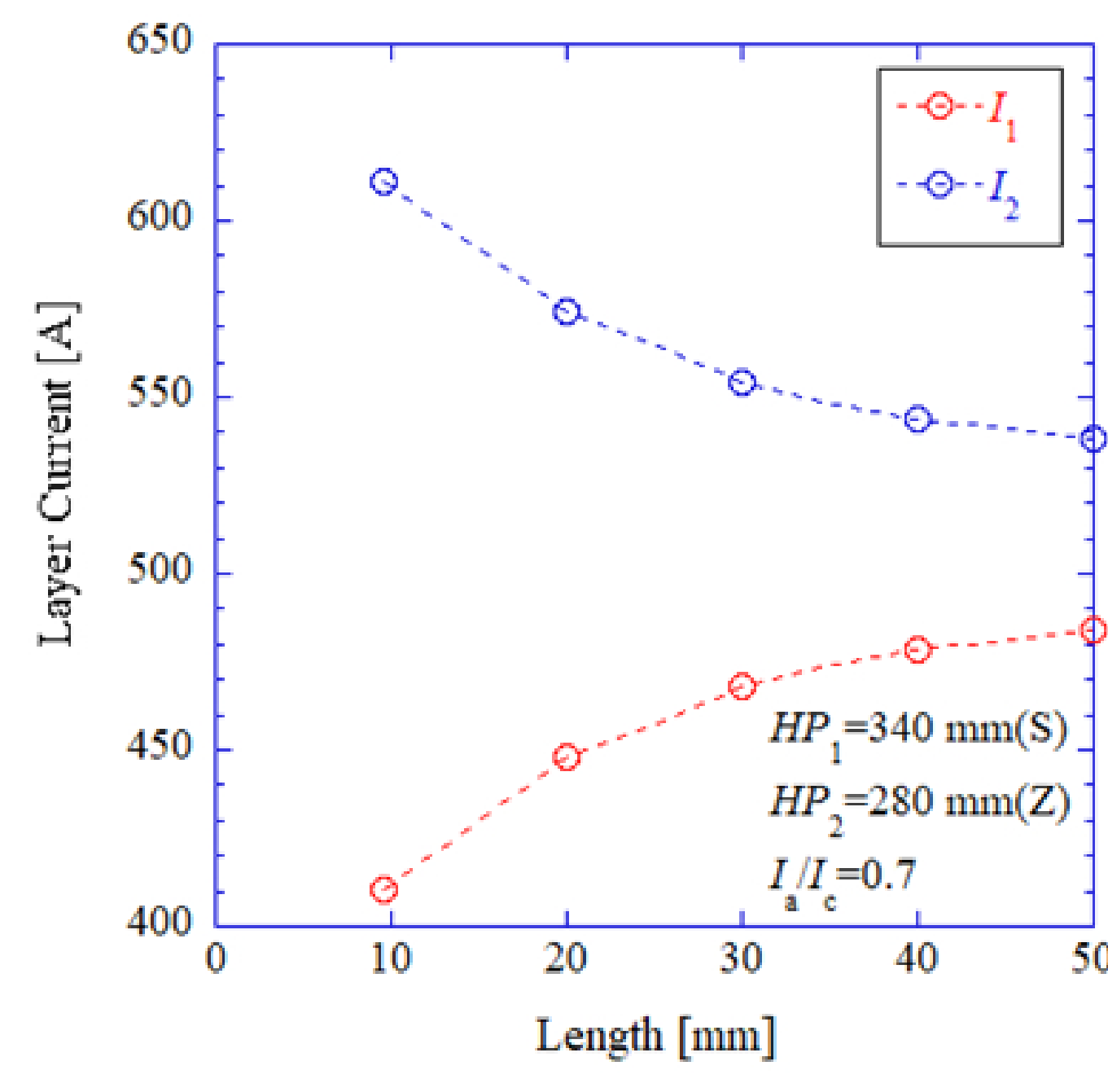


図6. 長さの異なるケーブルモデル



(a) 交流損失特性



(b) 層電流特性

図7. ケーブルモデルの長さに対する交流損失特性および層電流特性

## SSモデルの計算結果

各層の巻付け方向が同じSS巻きの2層ケーブルの損失計算を行った。

### 先行研究で提案されたケーブルの構成

・SS巻き(各層の巻付け方向が同じ)  
・螺旋ピッチ  $HP_1 = HP_2$   
・tape-on-gap (図9)

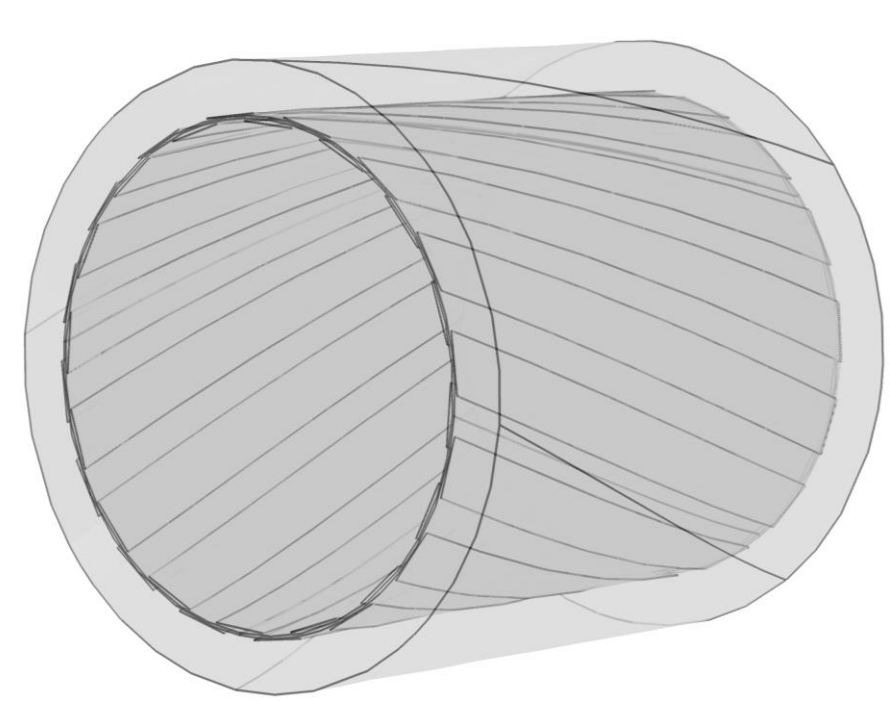
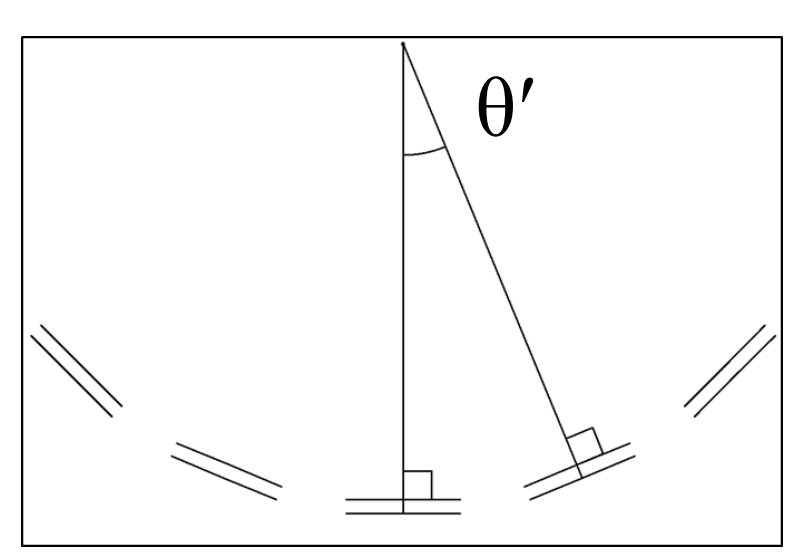
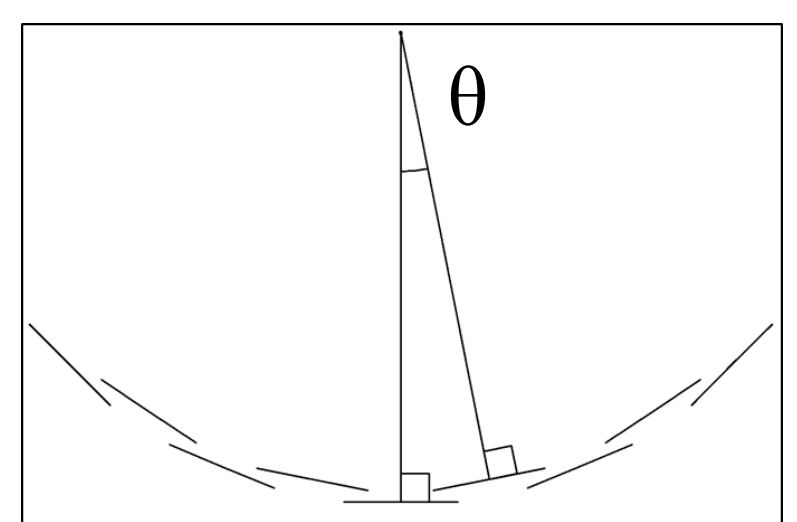


図8. 先行研究のモデル



(a)  $\theta/\theta' = 0$  (tape-on-tape)



(b)  $\theta/\theta' = 0.5$  (tape-on-gap)

図9. 相対位置の説明

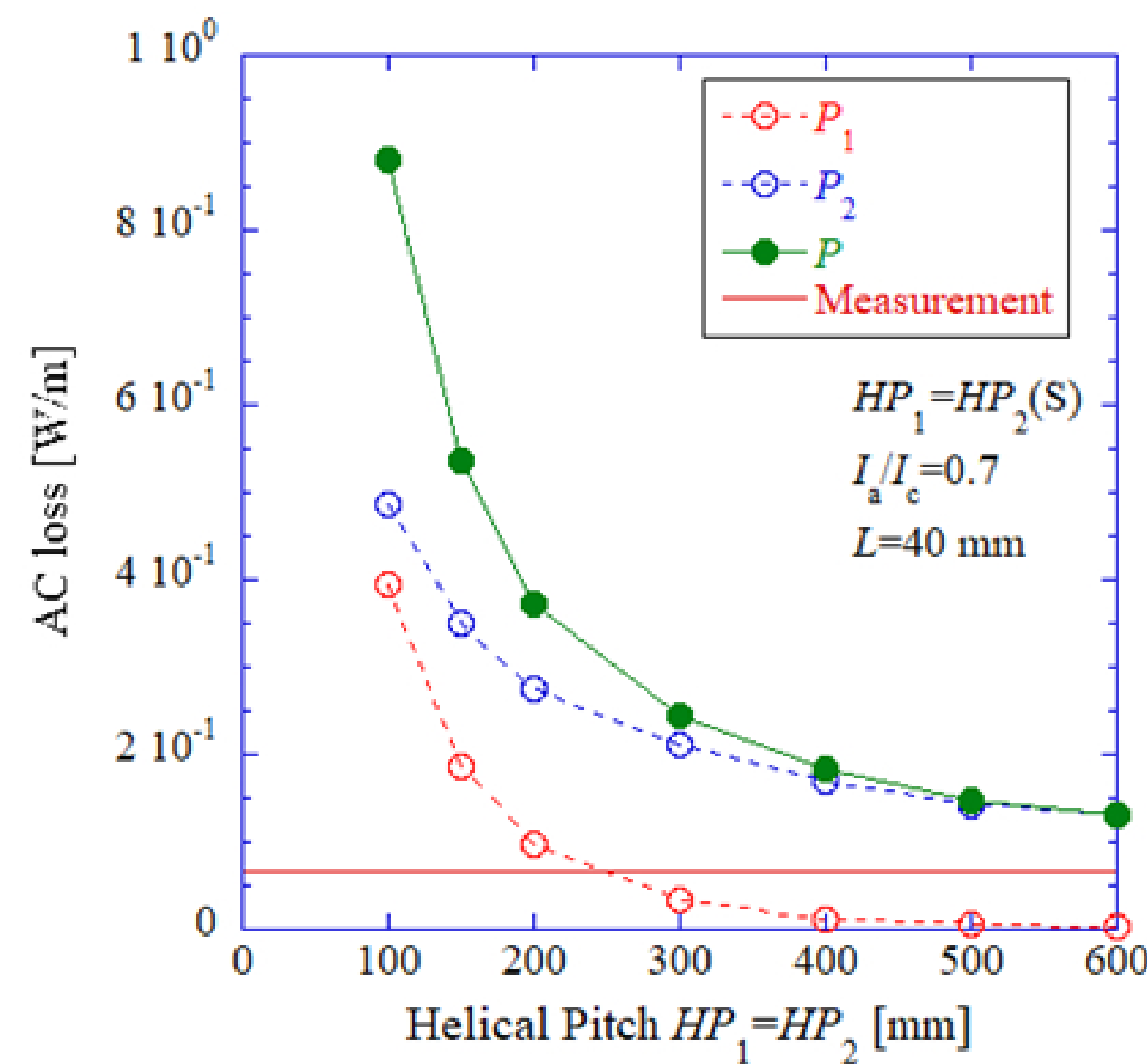
### 先行研究の計算方法

2次元電磁界解析と電気回路モデルを組み合わせた準3次元電磁界解析

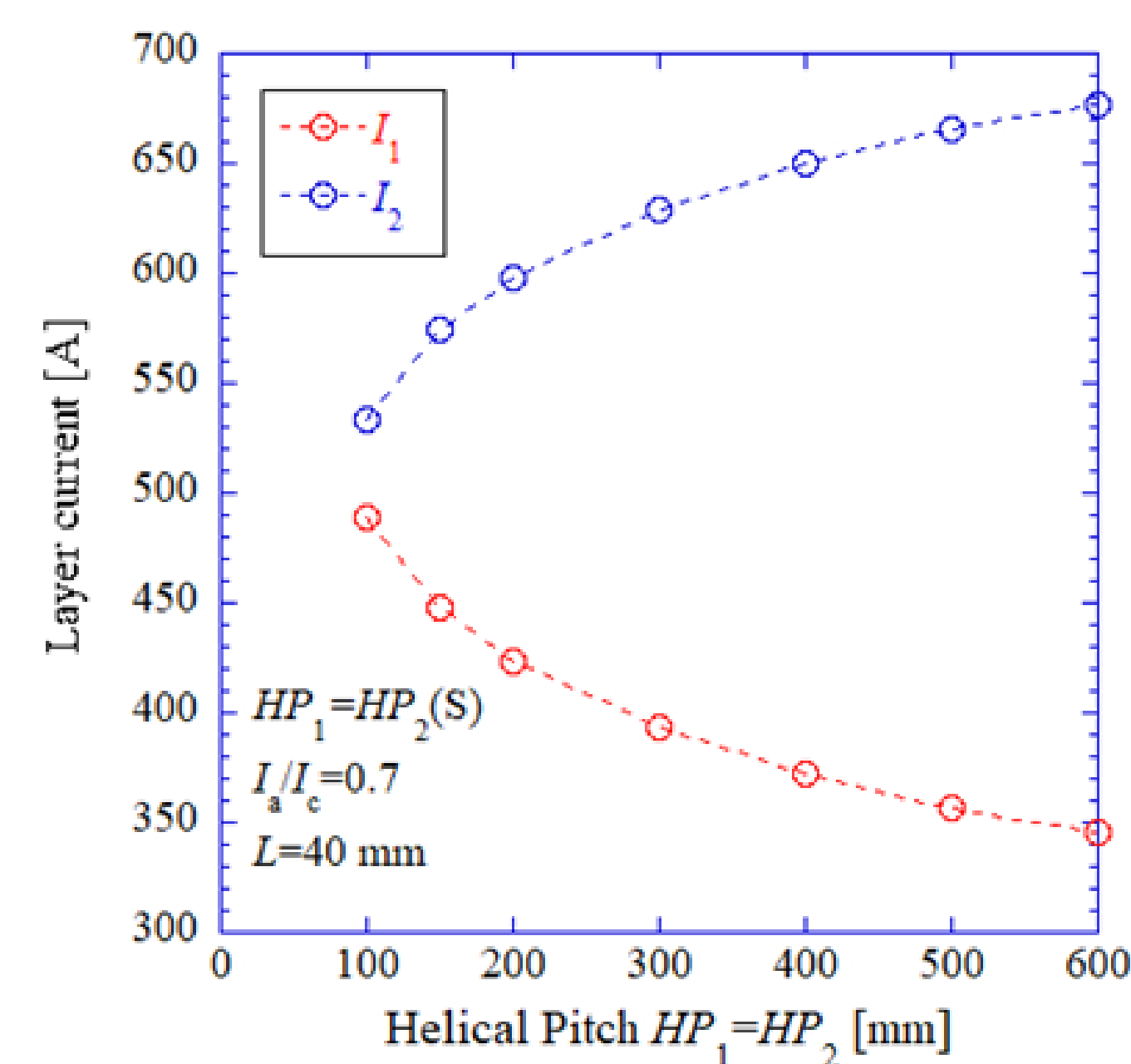
### 本研究の計算結果

3次元電磁界解析で計算を行うと、螺旋ピッチ  $HP_1 = HP_2$  が短くなるほど交流損失が増加した。

(先行研究の計算では  $HP_1 = HP_2 = 100$  mm で交流損失が最小だった。)



(a) 交流損失特性



(b) 層電流特性

図10. 螺旋ピッチ  $HP_1 = HP_2$  に対する交流損失および層電流特性

## まとめ

3次元電磁界解析によって計算した2層REBCO超電導ケーブルの交流損失は、古河電工(株)の測定値と一致した。また、損失の計算値はケーブルモデルの長さに依存し、一定の長さ以上で収束することが分かった。さらに、先行研究で提案されたケーブル構成方法では損失低減効果がなく、むしろ測定値より大きくなること分かった。

## 参考文献

[1] S. Mukoyama, M. Yagi, H. Hirano, Y. Yamada, T. Izumi, and Y. Shiohara: Development of HTS cable using YBCO coated conductor, Physica C, 445-448 (2006), 1050-1053.