

# 電気回路モデル及び三次元電磁界解析による 最小損失を持つ2層超電導電力ケーブルの設計

都城工業高等専門学校 電気情報工学科

○村崎 宮忠 今川 拓真

指導教員:野地 英樹

# 目次

1. 研究背景と目的
2. 研究方法
3. 研究の結果と考察
4. まとめ

# 1. 研究背景と目的

# 1. 研究背景と目的

近年、超電導ケーブルでの電力輸送が注目されている。



出典: 古河電工(株)

- ・超電導とは？
  - 物質を冷却すると  
抵抗( $R$ )が”ゼロ”になる現象！
  - つまり、ジュール損( $=I^2R$ )が発生しない！
  - これを送受電に利用できないか...？

# 1. 研究背景と目的

超電導ケーブルを用いた送電の**メリット**

直流では通電損失が**0**

敷設面積の**縮小**が図れる



出典: 古河電工(株)

# 1. 研究背景と目的

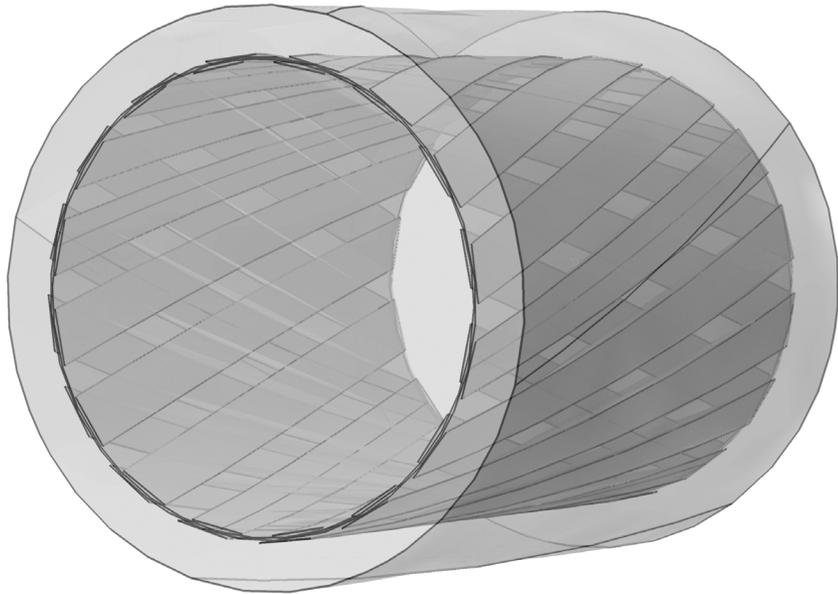
しかし、交流では損失が発生する...

現代社会の送受電システムは交流がメイン

→ この損失を小さくしなければならない



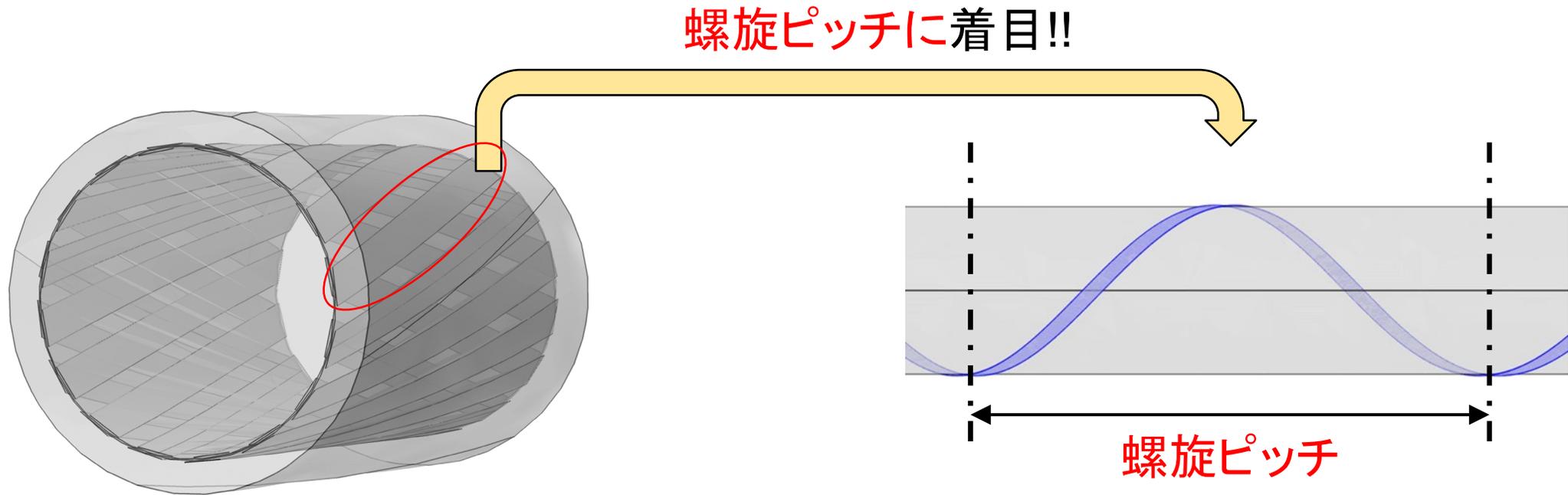
# 1. 研究背景と目的



古河電工(株)の作成した二層超電導ケーブルを基にしたモデル



# 1. 研究背景と目的



**螺旋ピッチ**: 円柱の側面を一周するのにかかる距離

**最適ピッチ**: 交流損失が最小となる螺旋ピッチ→これを決定

# 1. 研究背景と目的

## 超伝導電力ケーブルの螺旋ピッチの最適化

すべての螺旋ピッチの組み合わせで、三次元電磁界解析を行い最適ピッチを決定するのが理想



この方法では莫大な時間を要するため、計算時間を短縮した設計法を考えなければならない

## 2. 研究方法

## 2. 研究方法

設計法・・・

一次の設計・・・螺旋ピッチを変化させ、仮の最適ピッチを求めるプログラムを  
電気回路モデル(一次元)を基に作成

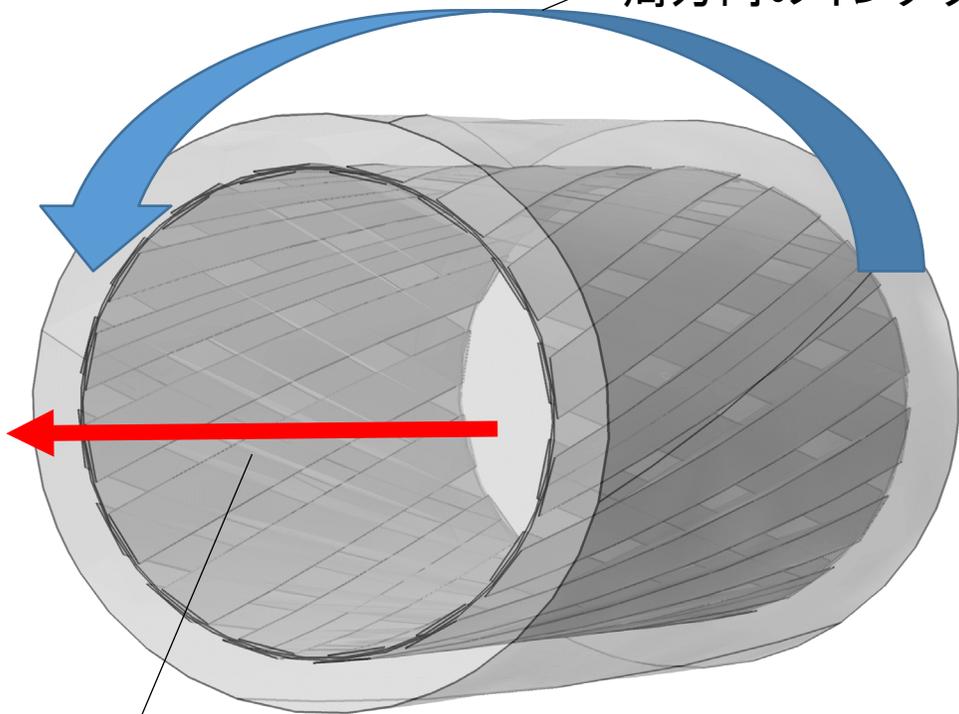
二次の設計・・・一次の設計で求めた螺旋ピッチ付近で三次元電磁界解析を行い、  
三次元における最小損失の時の螺旋ピッチを求める。

## 2. 研究方法

一次の設計・・・螺旋ピッチを変化させ、最小損失を求めるプログラムを  
電気回路モデル(一次元)を基に作成

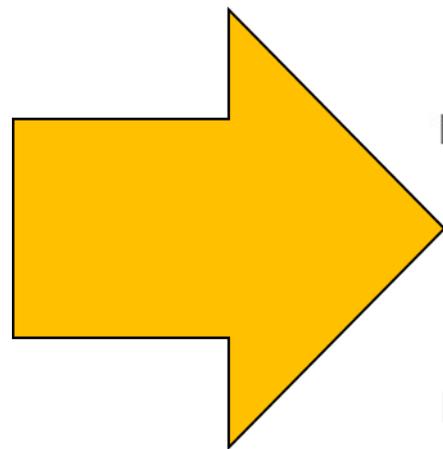
## 2. 研究方法

周方向のインダクタンス成分:  $L_c$

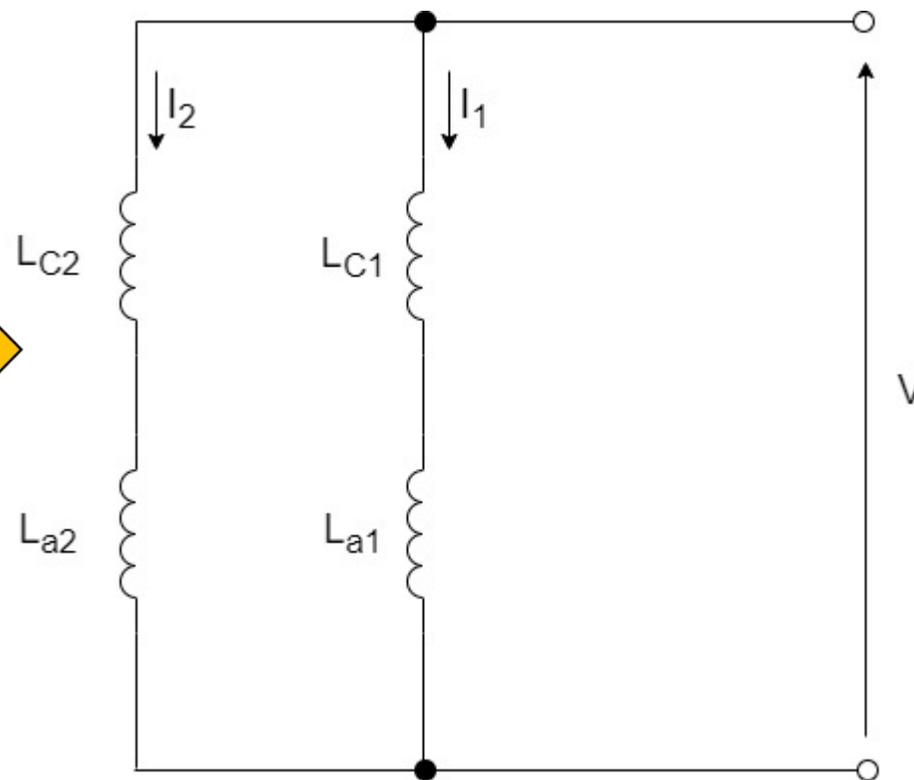


軸方向のインダクタンス成分:  $L_a$

二層超電導ケーブルモデル

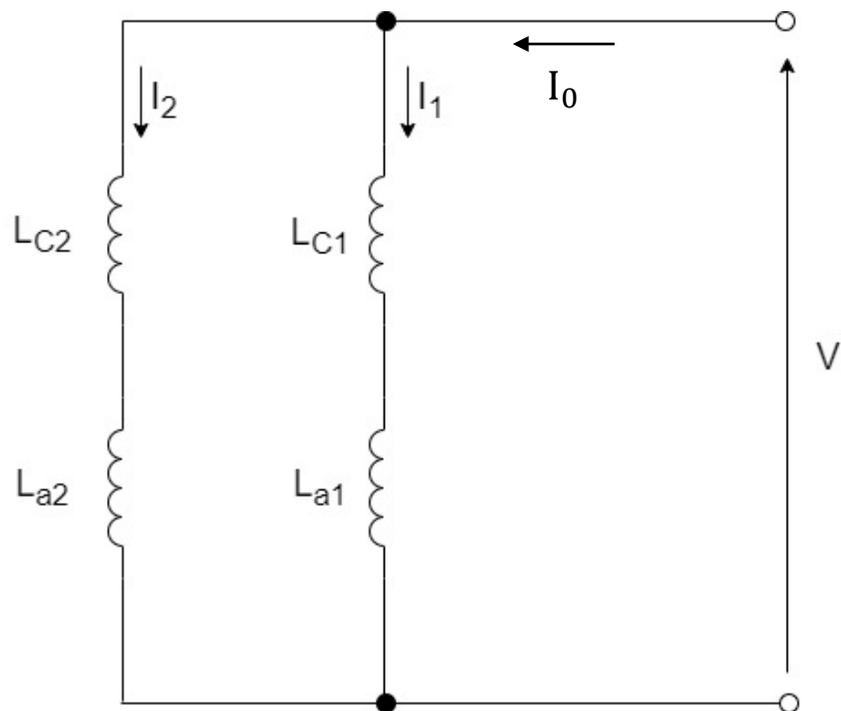


電気回路モデル



## 2. 研究方法

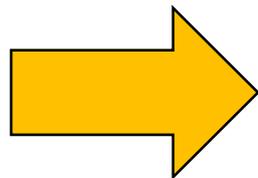
電気回路モデル



電圧方程式とキルヒホッフの電流則

$$\begin{pmatrix} V \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j\omega(L_{a1} + L_{c1}) & j\omega(M_{a12} + M_{c12}) \\ j\omega(L_{a1} + L_{c1}) & j\omega(M_{a21} + M_{c21}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$I_0 = I_1 + I_2$$



$L_{an}$  :  $n$ 層目の軸方向自己インダクタンス

$L_{cn}$  :  $n$ 層目の周方向自己インダクタンス

$M_{aij}$  :  $j$ 層目から $i$ 層目への軸方向相互インダクタンス

$M_{cij}$  :  $j$ 層目から $i$ 層目への周方向相互インダクタンス

これから各層の電流が求められる

## 2. 研究方法

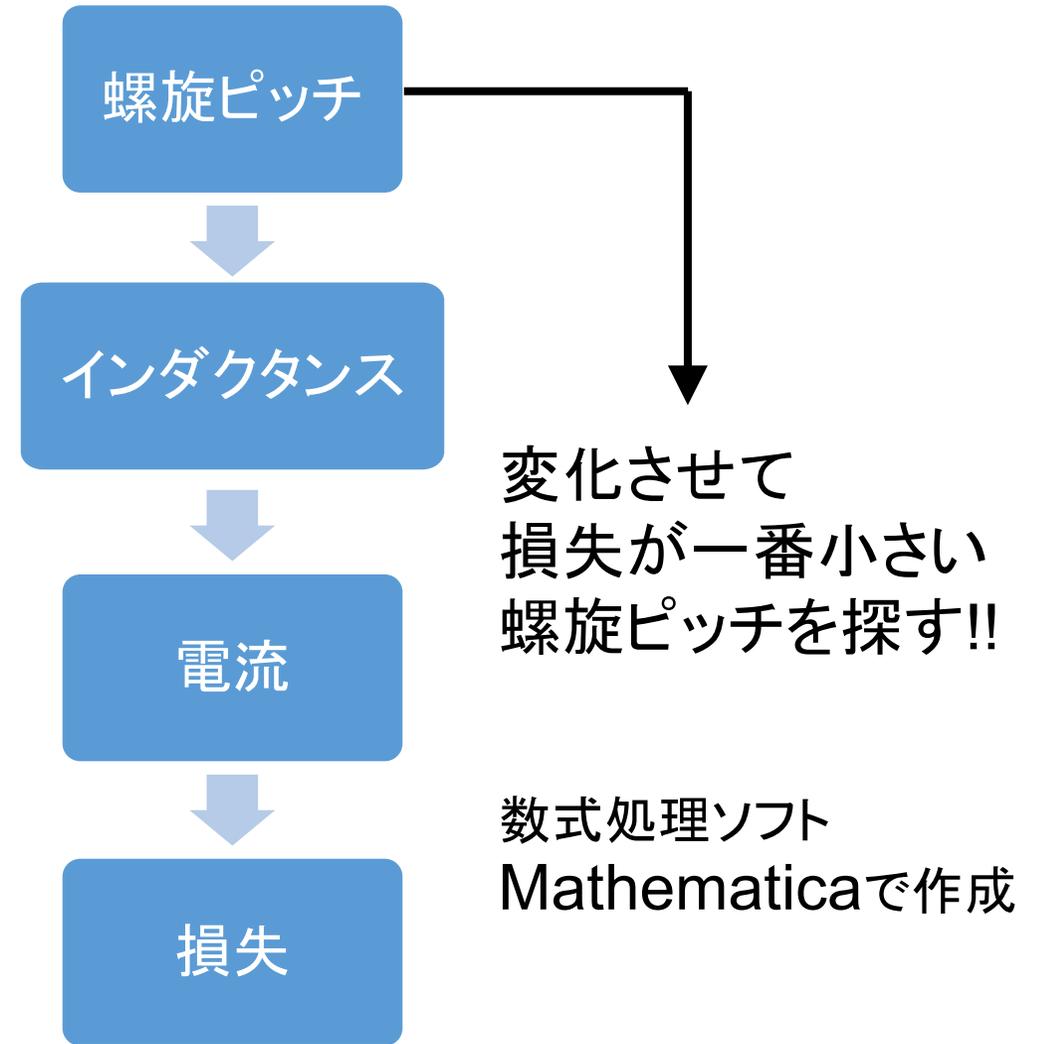
Norrisの式:(損失を求める式)

$$P = \frac{\mu_0 I_c^2 f}{\pi} \{(1-i)\ln(1-i) + (1+i)\ln(1+i) - i^2\}$$

$I_c$  : 臨界電流 (超伝導体に流せる限界の電流の値)

$i$  : 規格化電流 (臨界電流に対する通電電流の比)  
( $= I_n / I_c$ )

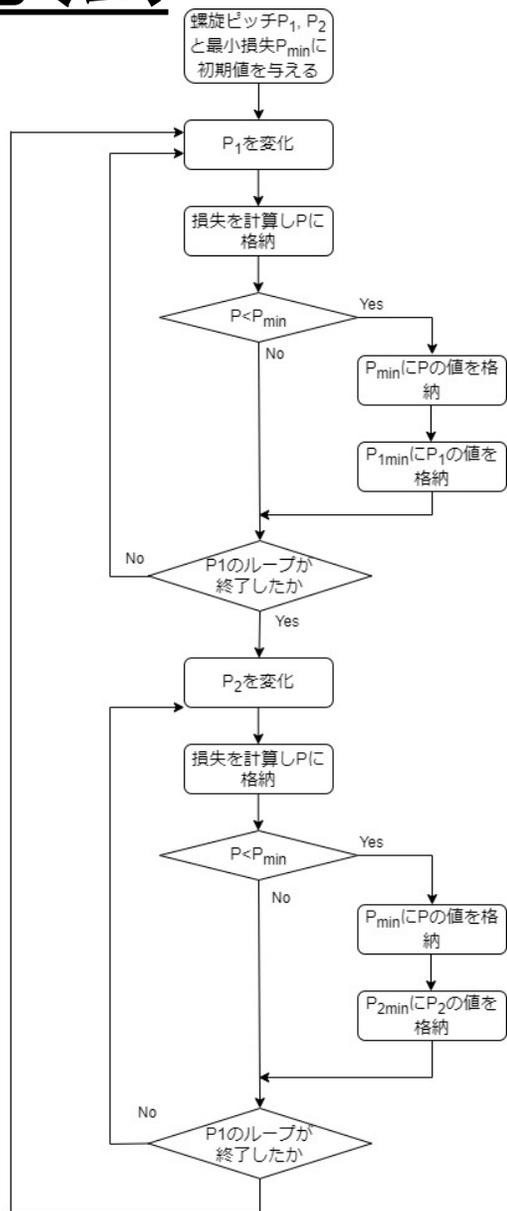
$f$  : 通電電流の周波数



# 2. 研究方法

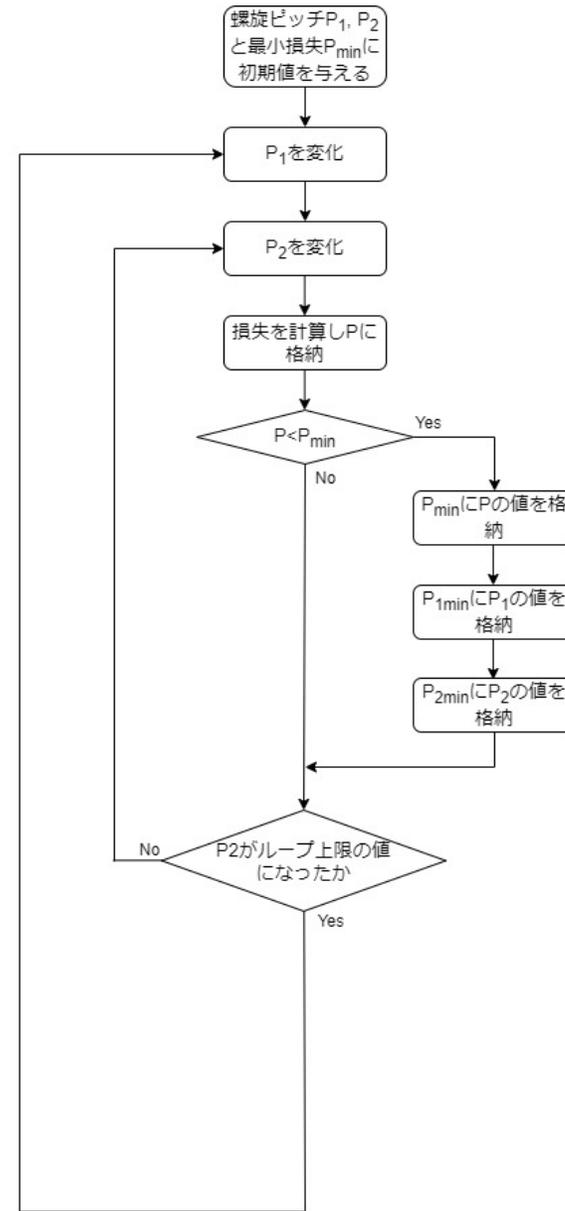
最適ピッチ導出  
プログラム(1)  
[最適ピッチ(1)]

→ 先行研究の  
アルゴリズム



最適ピッチ導出  
プログラム(2)  
[最適ピッチ(2)]

→ 総当たり式

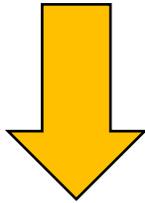


## 2. 研究方法

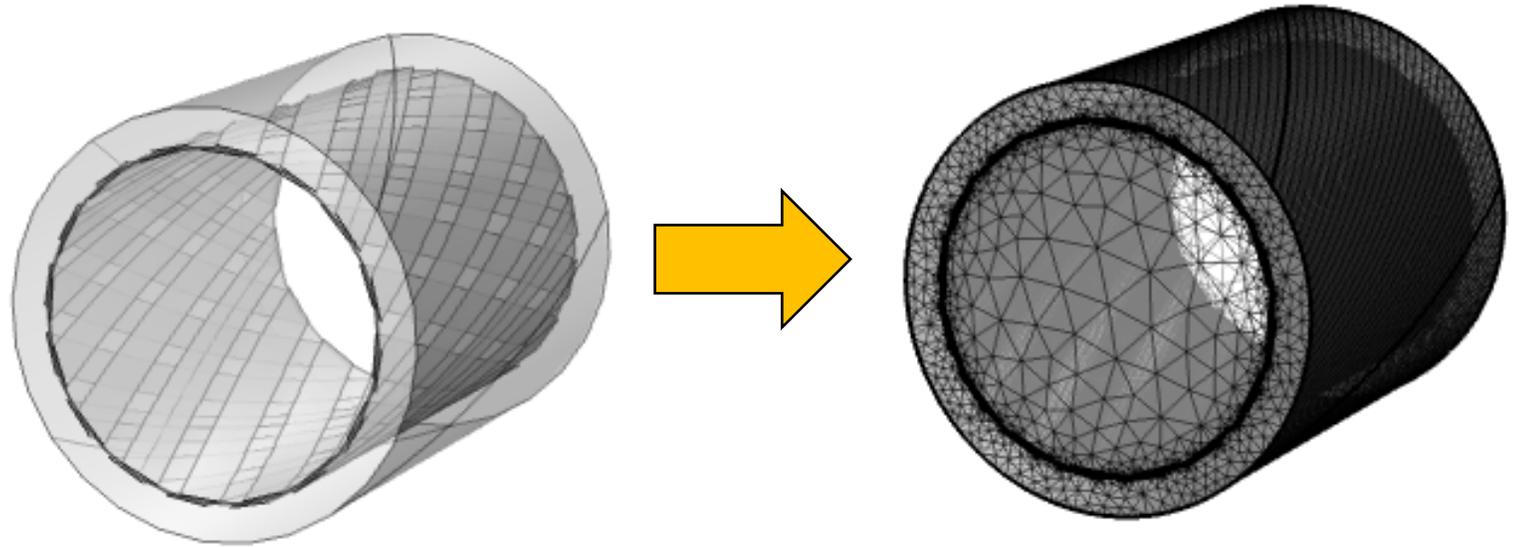
二次の設計・・・一次の設計で求めた螺旋ピッチ付近で三次元電磁界解析を行い、  
三次元における最小損失の時の螺旋ピッチを求める

## 2. 研究方法

超電導ケーブルの三次元電磁界解析



**COMSOL:**  
有限要素法を用い、モデルの解析を行う  
シミュレーションソフト



有限要素法: 物体を要素と呼ばれる小さな領域に分割し、モデルを解析する手法

## 2. 研究方法

解析手法: **H-formulation** (H [磁界] を変数として計算)

1. ファラデーの法則

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

2. アンペールの法則

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

3. 超電導テープの抵抗率とオームの法則

$$E_x = \rho_{scx} \cdot J_x \quad \rho_{scx} = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{J_x}{J_c} \right)^{n-1}$$

$$E_y = \rho_{scy} \cdot J_y \quad \rho_{scy} = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{J_y}{J_c} \right)^{n-1}$$

$$E_z = \rho_{scz} \cdot J_z \quad \rho_{scz} = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{J_z}{J_c} \right)^{n-1}$$

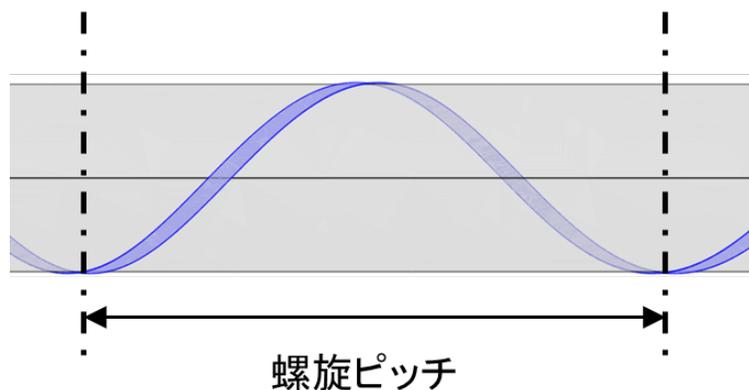
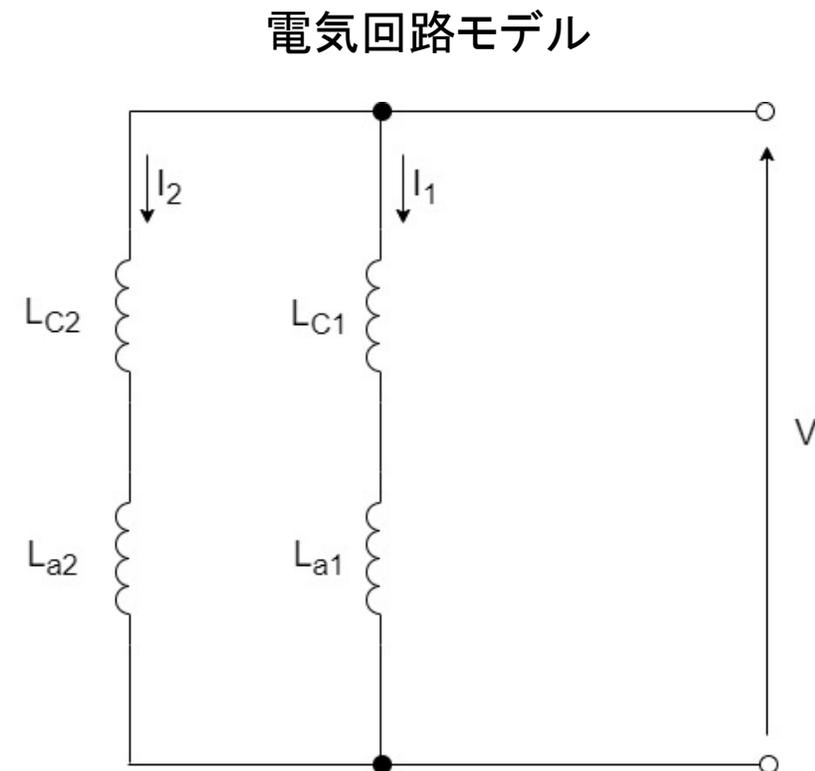
4. 交流損失の計算式

$$P = \frac{f}{L} \int_{\frac{1}{f}} dt \int_V (E_x J_x + E_y J_y + E_z J_z) dV$$

# 3. 研究結果と考察

# 3. 研究結果と考察

	古河電工モデルの螺旋ピッチ	電気回路モデルから導出した最適ピッチ(1)	電気回路モデルから導出した最適ピッチ(2)
1層目のピッチ [mm]	340	690	2945
2層目のピッチ [mm]	-280	-360	-414



※2層目の-は1層目の螺旋の向きと違うことを示す。

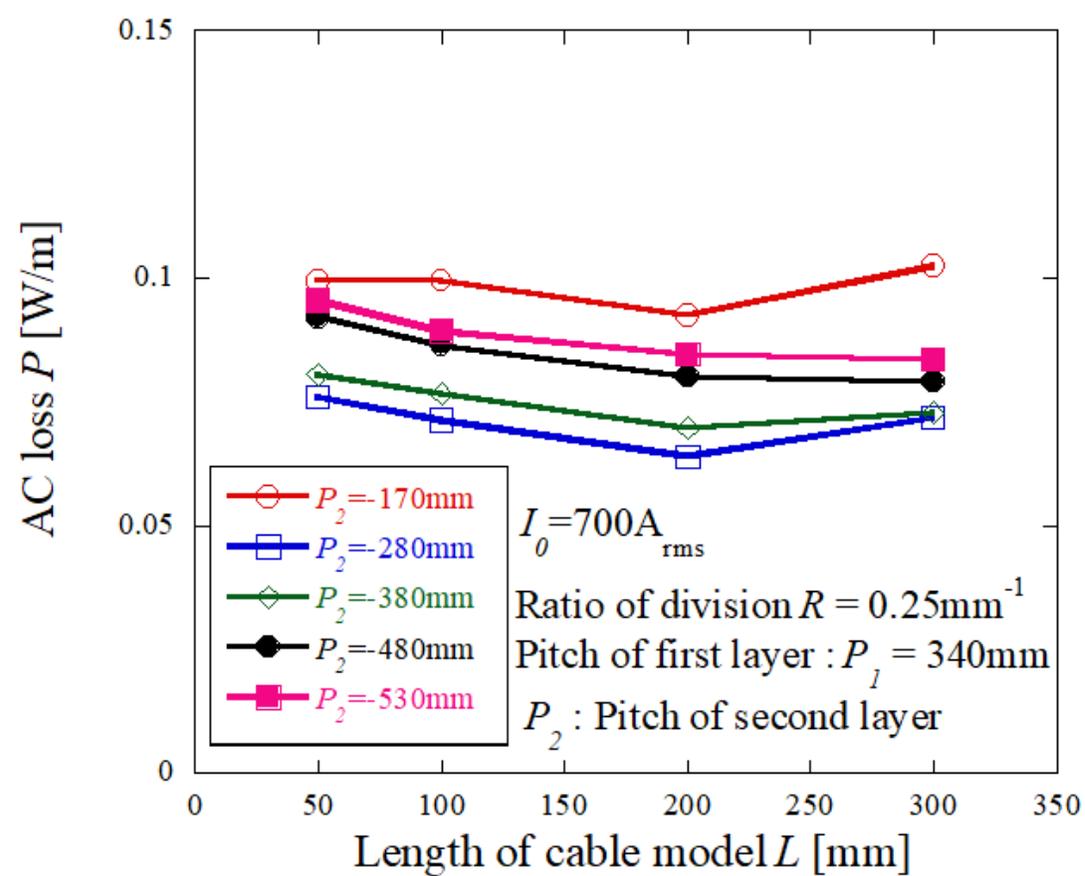
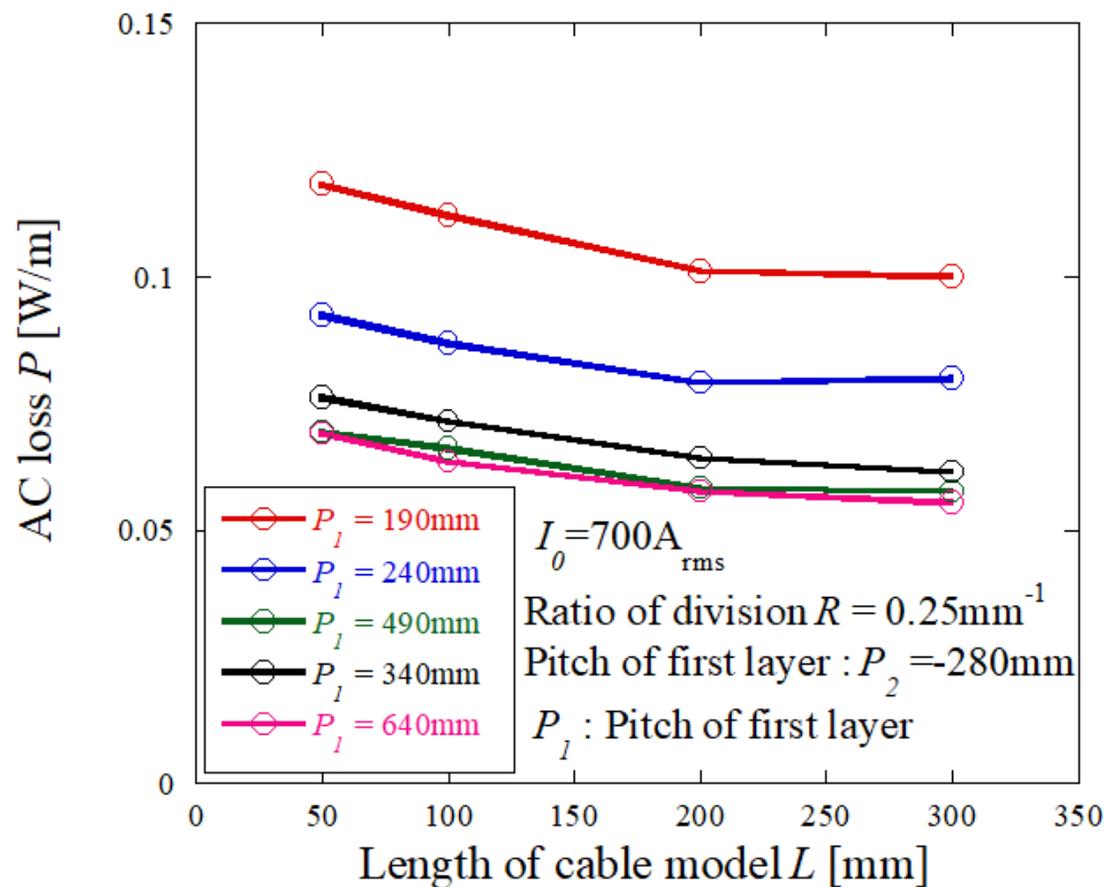
### 3. 研究結果と考察



丁度いい長さ:  $L$  と分割割合:  $R$  (単位長さ当たりの分割数) は...?

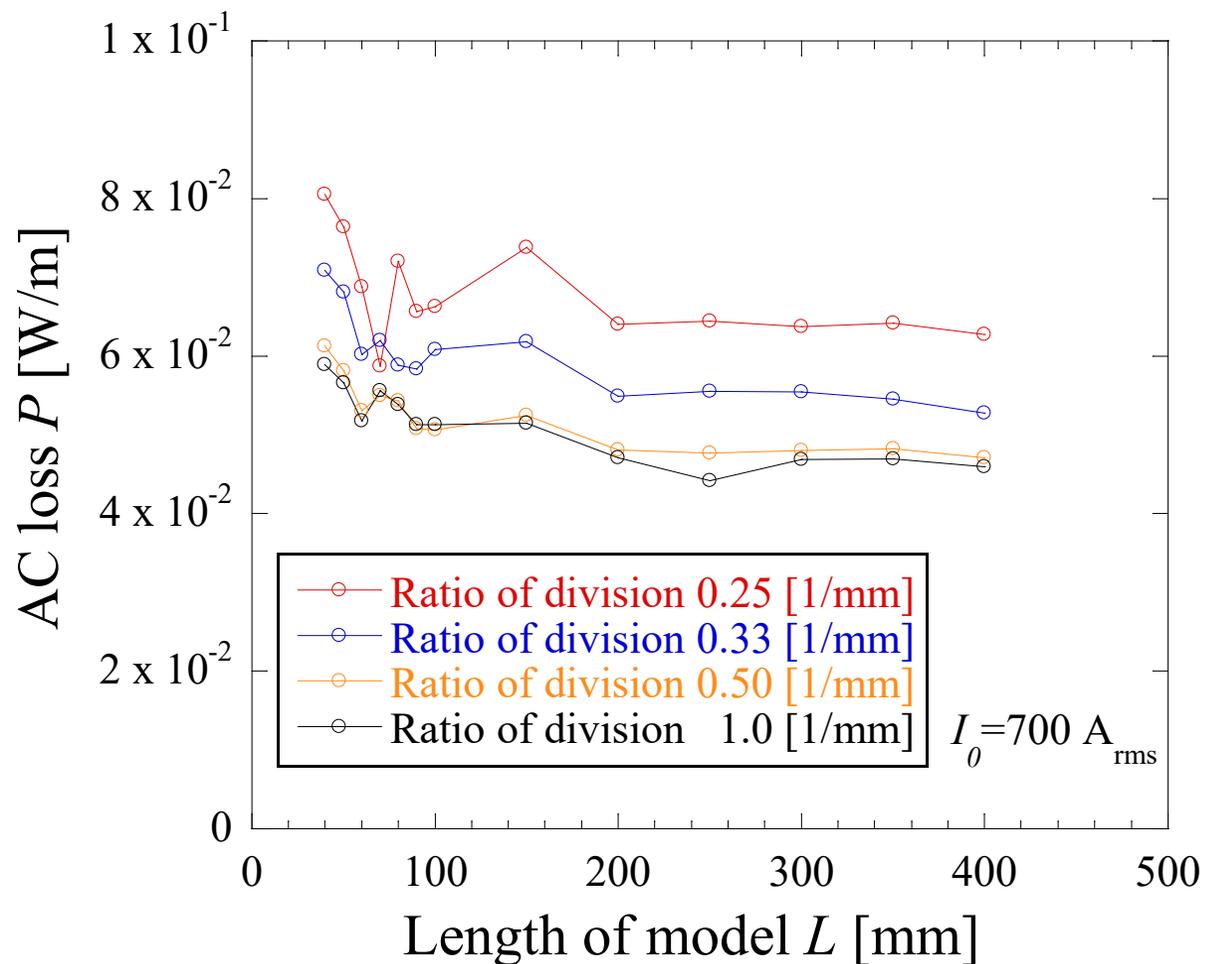


### 3. 研究結果と考察

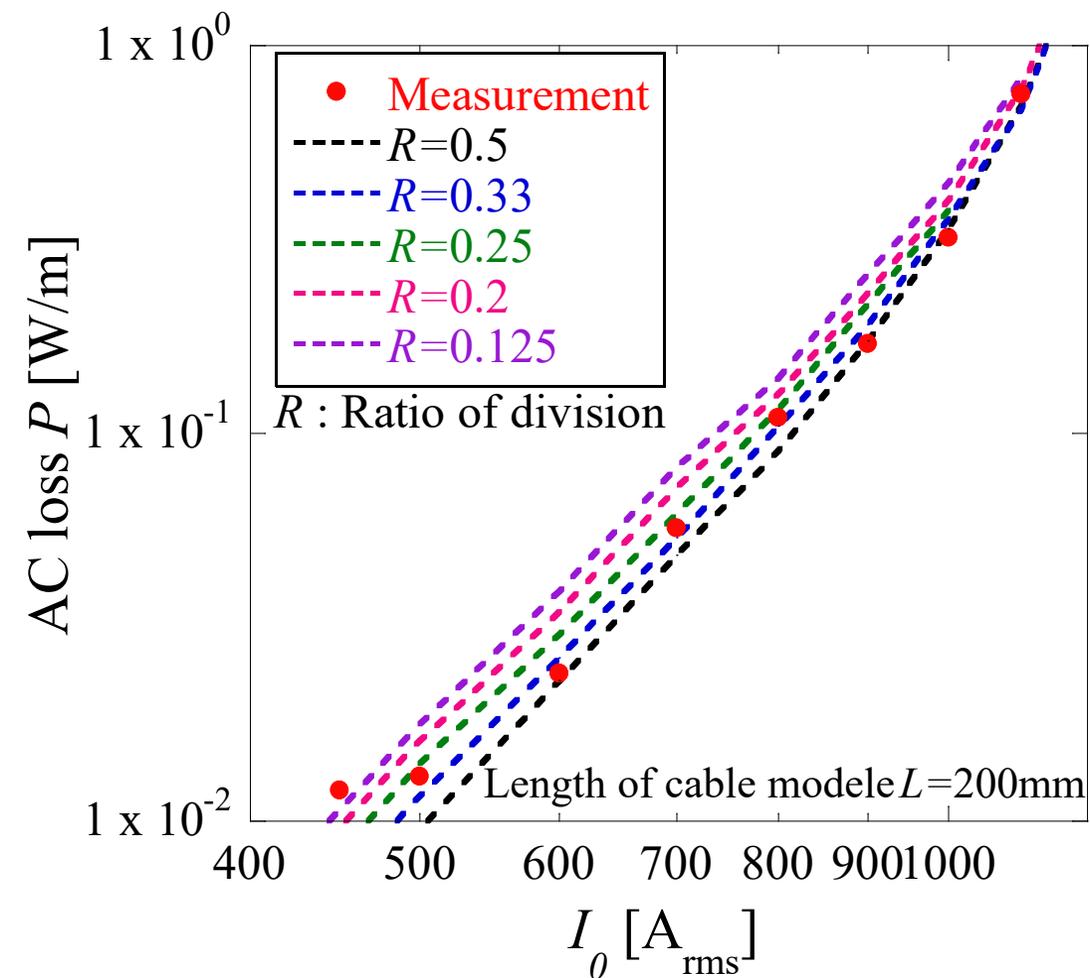


→  $L \geq 200\text{mm}$  で 損失の変化が少なくなっている

# 3. 研究結果と考察



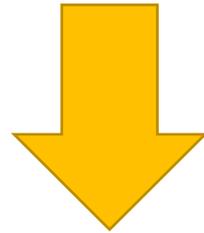
分割の割合が少ないほど計算時間は早い



計算値上に測定値が存在している( $R=0.5$ )→計算は正確である

### 3. 研究結果と考察

モデルの長さ $L$ : 200mm  
分割割合 $R$ : 0.5



正確かつ短い時間で解析ができる!!!



# 3. 研究結果と考察

## 三次元電磁界解析の結果

螺旋ピッチ $P_1, P_2$ [mm]	1層目の電流 $I_1$ [A]	2層目の電流 $I_2$ [A]	交流損失(計算値) $P$ [W/m]
340, -280 古河電工の作成値	696.31	721.51	0.36
690, -360 最適ピッチ(1)	708.40	709.41	0.36
2945, -414 最適ピッチ(2)	711.30	706.52	0.37

通電電流:  $I_0 = 1000$ [Arms]

# 3. 研究結果と考察

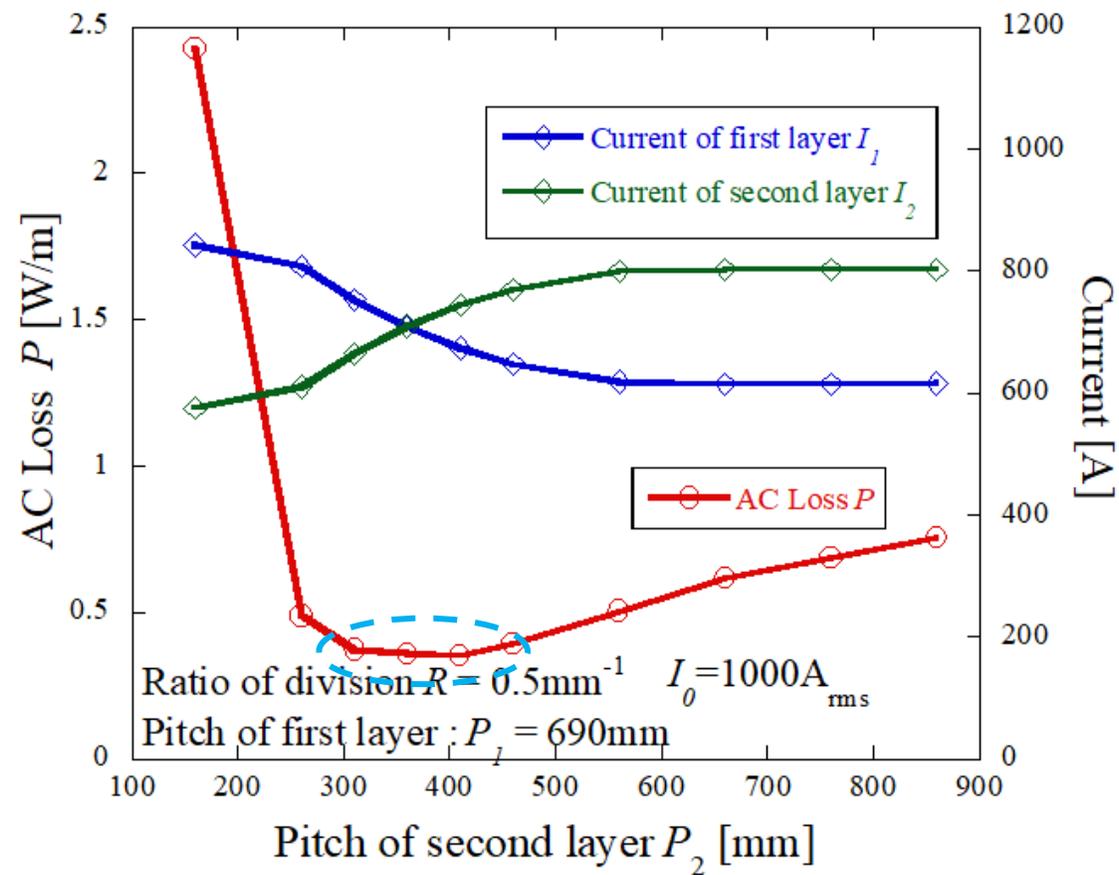
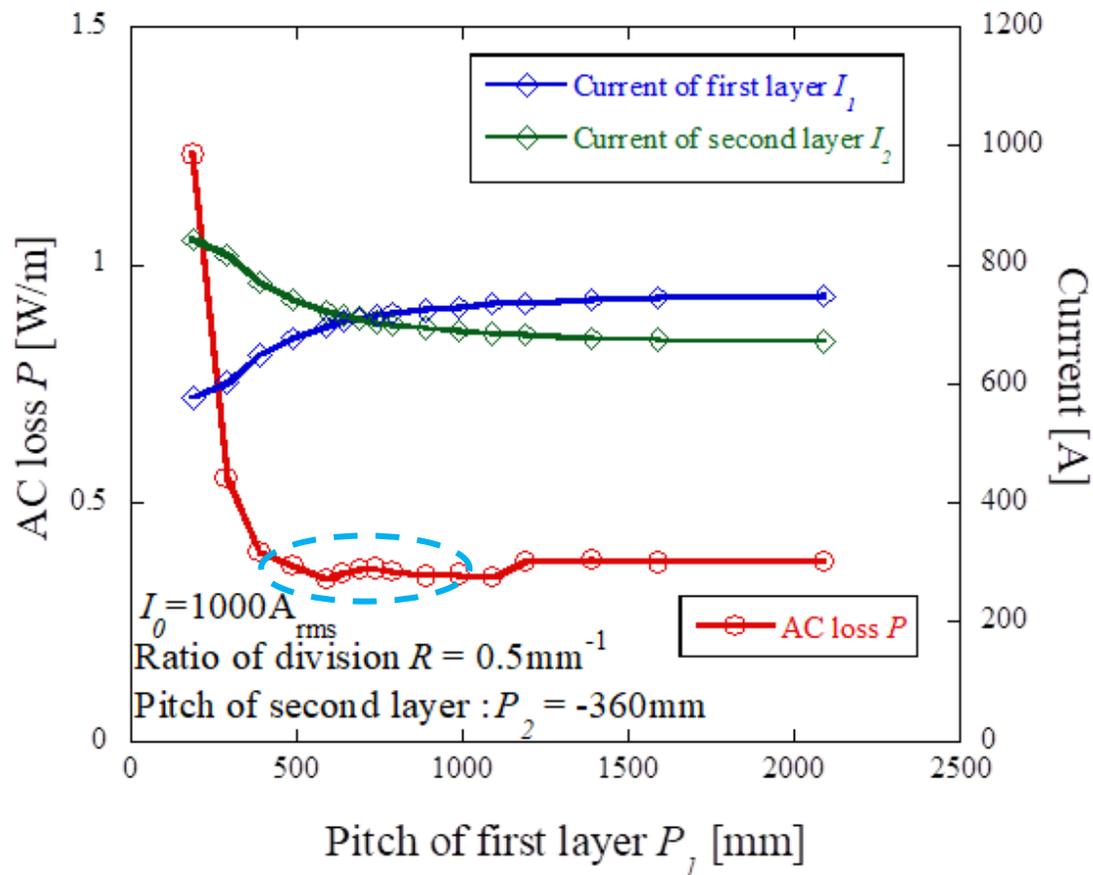
螺旋ピッチ $P_1, P_2$ [mm]	理想状態に対する $I_1$ の偏差[%]	理想状態に対する $I_2$ の偏差[%]
340, -280 古河電工の作成値	1.53	2.04
690, -360 最適ピッチ(1)	0.183	0.326
2945, -414 最適ピッチ(2)	0.593	0.083

理想状態:  $I_1 = I_2 = I_0/2$   
(すべての層に均一な電流  
が流れる状態)

→プログラムで導出した螺旋ピッチを持つケーブルの方が理想状態に近い  
→より**偏流**を抑えることができる！

※**偏流**…各層に流れる電流に偏りが生じる現象。交流損失の大きな要因として考えられる。

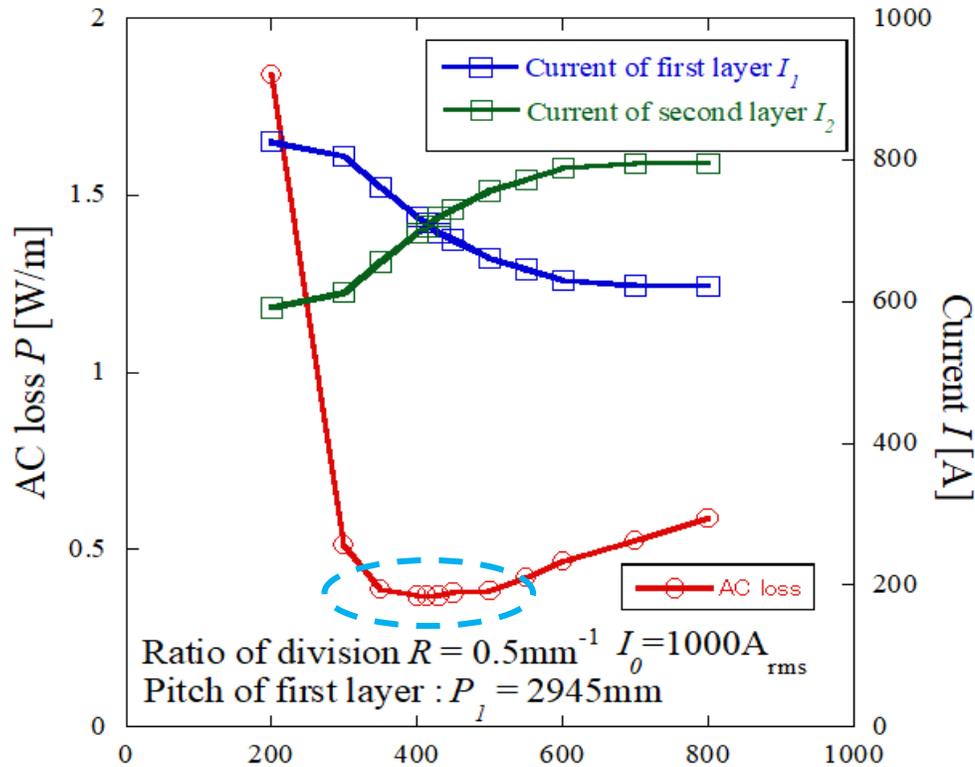
# 3. 研究結果と考察



$(P_1, P_2) = (690, -360)$   
最適ピッチ(1)

青の点線(導出した螺旋ピッチ付近)で囲まれた部分で損失が最低となっている!

# 3. 研究結果と考察



Pitch of second layer  $P_2$  [mm]  
 $(P_1, P_2) = (2945, -414)$   
最適ピッチ(2)

青の点線で囲まれた部分で損失が最低となっている！



超電導電力ケーブルの螺旋ピッチの最適化が出来た！！

## 4. まとめ

## 4. まとめ

- ① **電気回路モデル**を基に仮の最適ピッチを決定する。
- ② ①で算出された螺旋ピッチを中心としたある範囲で螺旋ピッチを変化させて**三次元電磁界解析**を行い、最適ピッチを決定する。

→この設計法で効率よく螺旋ピッチの設計が行える。

ご清聴ありがとうございました