

多芯薄膜線材による超電導電力ケーブルの 交流損失の低減

機械電気工学専攻 野地研究室

増田 陽平

指導教員 野地英樹

目次

1. 研究背景と目的
2. 研究方法
3. 研究結果と考察
4. まとめ

1. 研究背景と目的

・ 研究背景

超伝導ケーブルに直流電流を流す場合。



臨界電流に達するまで損失がゼロになる。

超伝導ケーブルに交流電流を流す場合。



自己磁界が発生し、エネルギー損失が生じる。

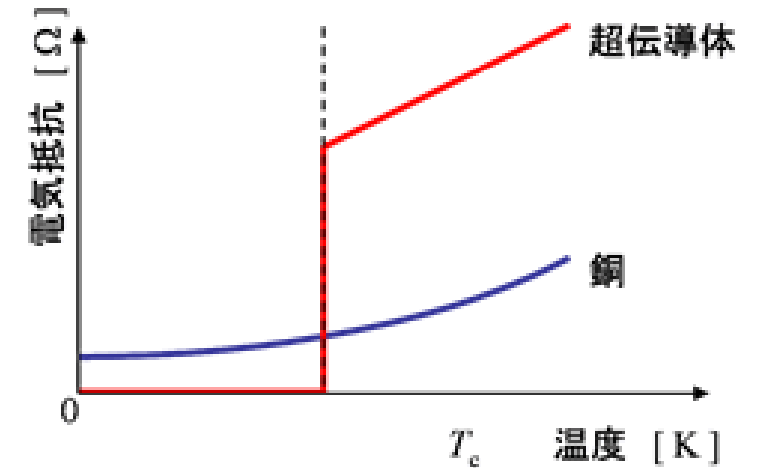


図1 超伝導体と銅の温度による電気抵抗の変化

asta muse. 「交流用超電導ケーブル」.
<https://astamuse.com/ja/published/JP/No/2005129458> (2021年12月20日)

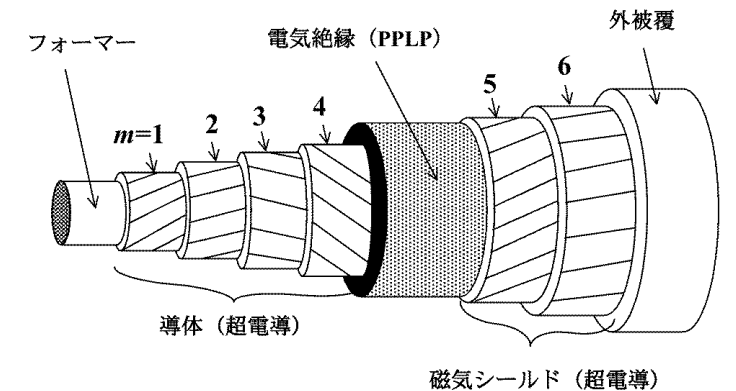


図2 超電導ケーブルの模式図

超電導ケーブルのほうが、銅ケーブルより送配電線として優れている。



エネルギー損失の少ない超電導ケーブルの開発が進んでいる。



超電導ケーブルの損失をプログラムで解析することによりエネルギー損失の少ない超電導ケーブルの設計を行うことができる。

新エネルギー・産業技術総合開発機構. 「超電導技術<高温超電導ケーブル・線材>」. https://www.nedo.go.jp/activities/DA_outline-sc.html (2021年12月20日)

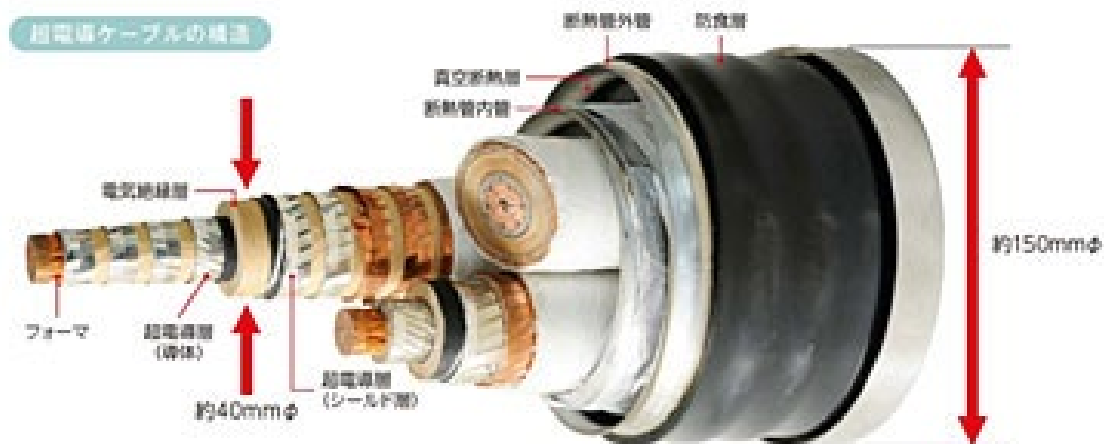


図3 超伝導ケーブルの構造

解析における基本式

1. ファラデーの法則

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

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. オームの法則

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

解析における基本式

4. 超電導特有の指数則

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

5. 交流損失の計算式

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

2. 研究方法

本研究は以下に示す手順で解析を行い、交流損失の低減を図った。

① 多芯薄膜線材の解析

(1) 分割数に関する解析

(2) 線材の長さ依存性に関する解析

② 多芯薄膜線材より構成した2層超電導ケーブル

(1) 通電損失特性に関する解析

- ・多芯化について

超電導線材に垂直磁界を印加した場合の単位面積当たりの発熱量 ΔQ

$$\Delta Q = \mu_0 J_c \left\{ \frac{d \Delta H_m}{2} + \frac{\Delta J_c d^2}{3} \right\}$$

d : 線材の幅 H_m : 印加磁界

超電導体の垂直磁界による損失は線材の横幅が変数となり、値が決定される。

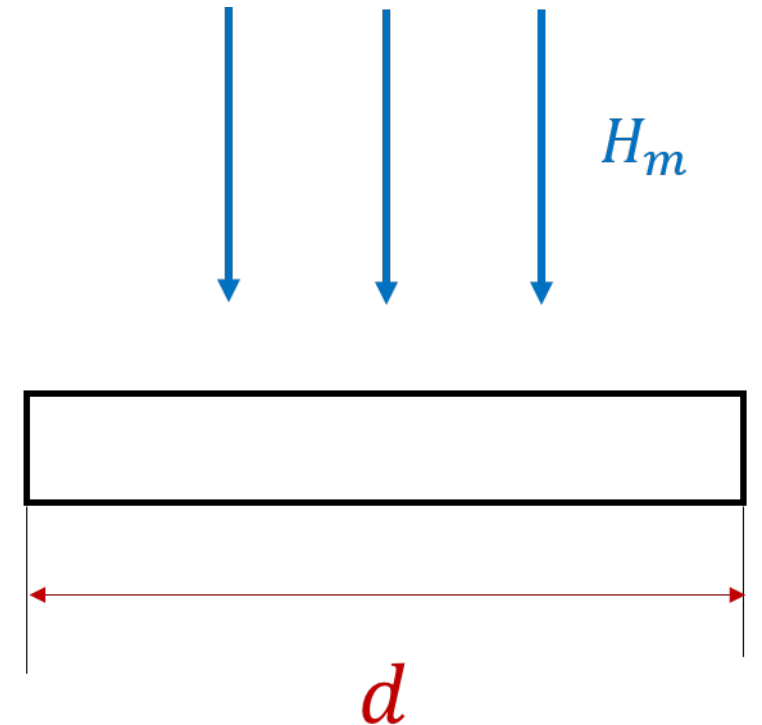


図4 線材に垂直磁界を印加した様子

薄膜線材にスリット（溝）を設ける（多芯化）。



単位面積当たりの損失を減らす。



多芯薄膜線材をケーブルに適用。

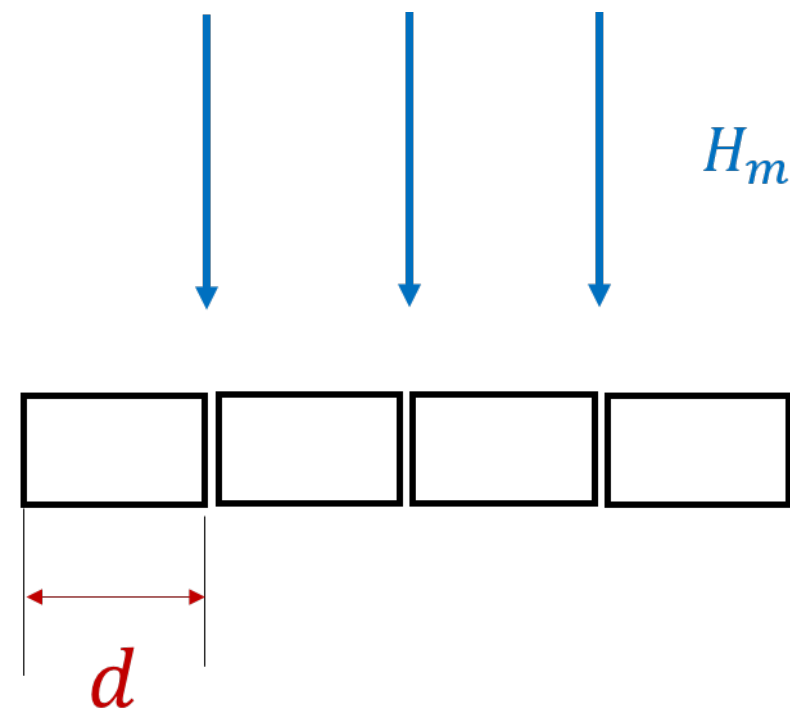


図5 多芯薄膜線材に垂直磁界を印加した様子

①多芯薄膜線材の解析

(1)分割数に関する解析

薄膜線材 (L=10 [mm]) を2~4分割で多芯化し、垂直磁界を印加した場合の磁化損失特性を解析。



分割数による磁化損失の変化を調査する。

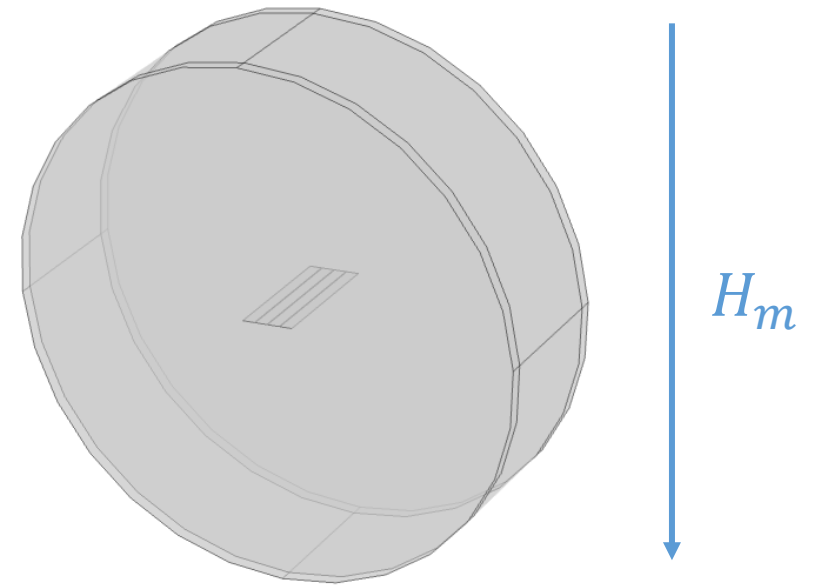


図6 多芯薄膜線材の解析モデル (分割数N=4)

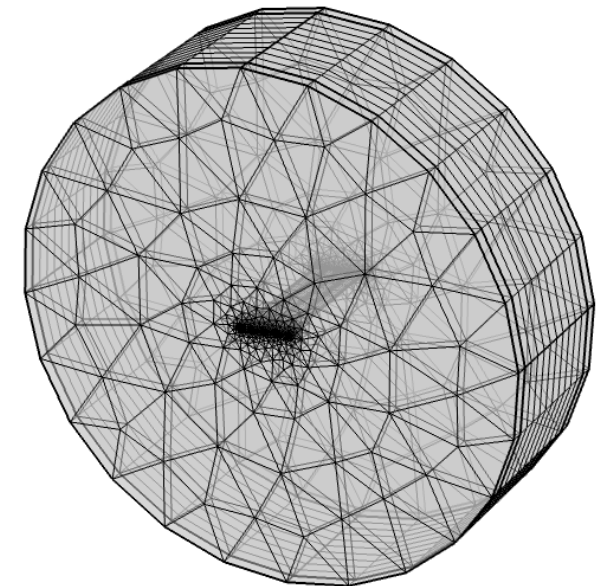


図7 多芯薄膜線材の解析モデルのメッシュ

(2) 線材の長さ依存性に関する解析

独立した状態になるまでにかかる時間を減らす。

遮蔽電流ループのインダクタンスを減らす
線材間の抵抗を大きくする。

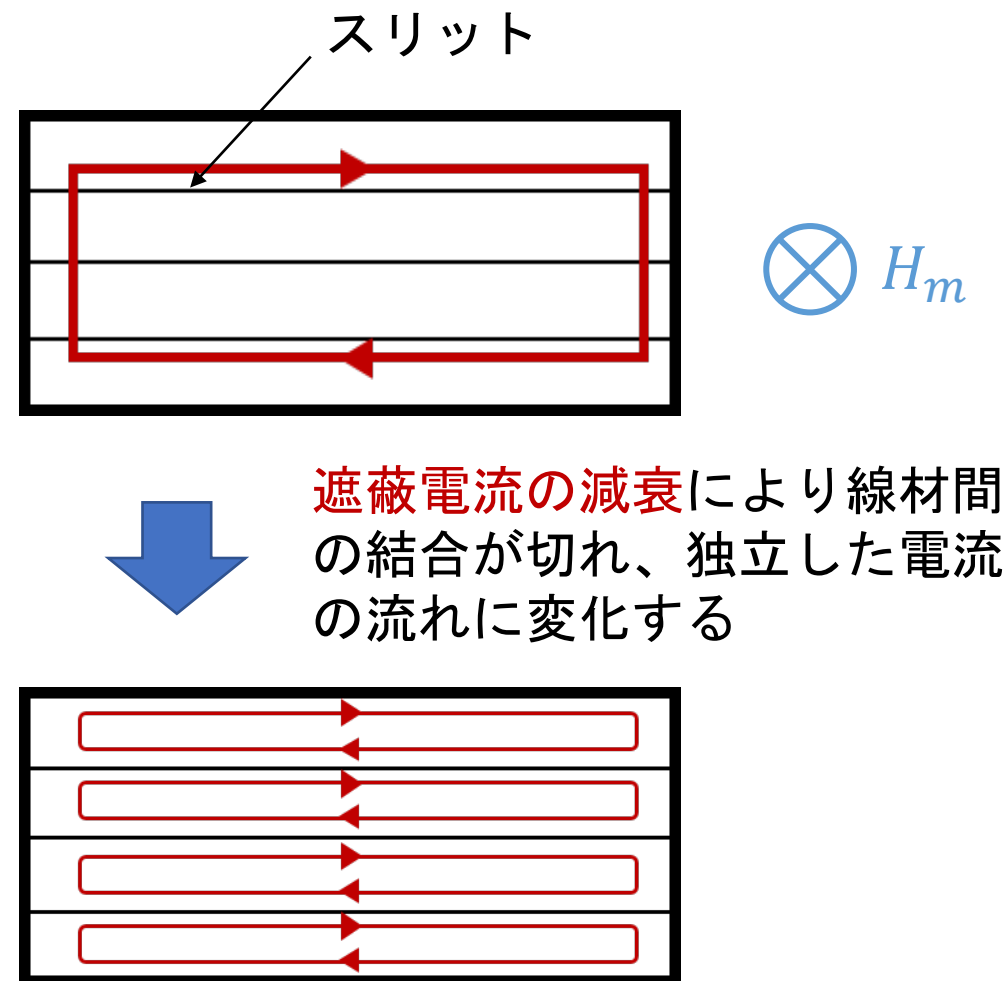


図8 線材を流れる磁化電流

(2) 線材の長さ依存性に関する解析

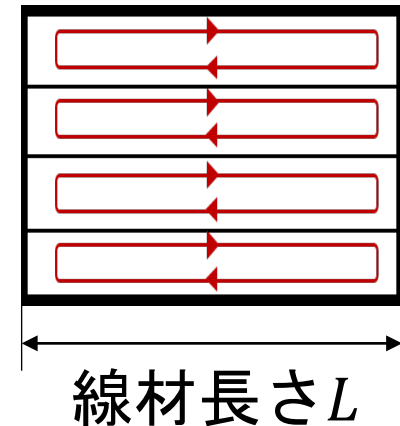
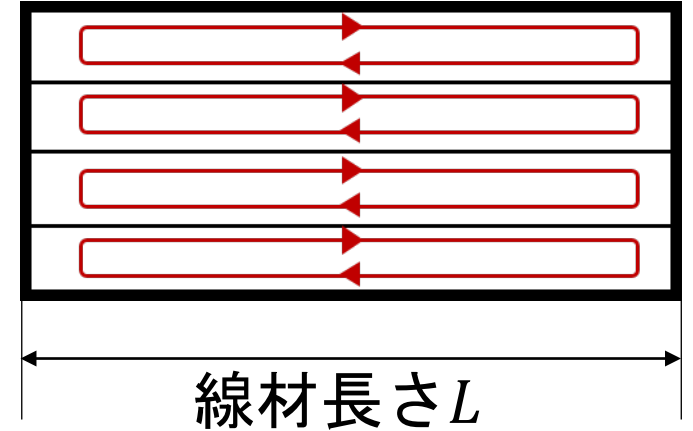
線材の長さを短くし、遮蔽電流ループの短縮を図る。



薄膜線材 (分割数 $N=4$) の長さを1~50 [mm] の間で変化させ、垂直磁界を印加した場合の磁化損失特性を解析。



線材長さによる磁化損失の変化を調査する。



②多芯薄膜線材より構成した2層超電導ケーブル (1) 通電損失特性に関する解析

薄膜線材より構成した超電導ケーブルの規格化電流に対する交流損失特性を解析。



多芯薄膜線材が及ぼすケーブルの通電損失特性への影響を調査する。

表1 2層超電導ケーブルの各パラメータ

線材の分割数	4
スリット幅	50 μm
ケーブル長さ	40 mm
各層のテープ数	16
1層目の巻きピッチ	340 mm
2層目の巻きピッチ	280 mm

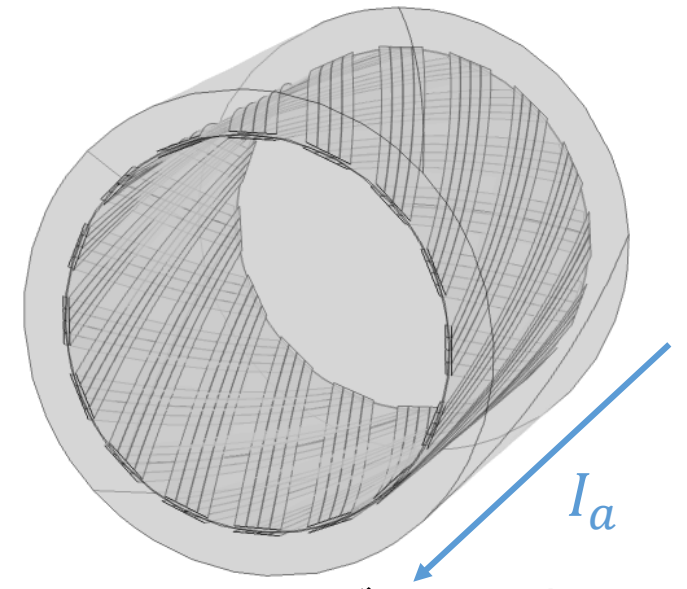


図9 超電導ケーブルの解析モデル
(分割数N=4)

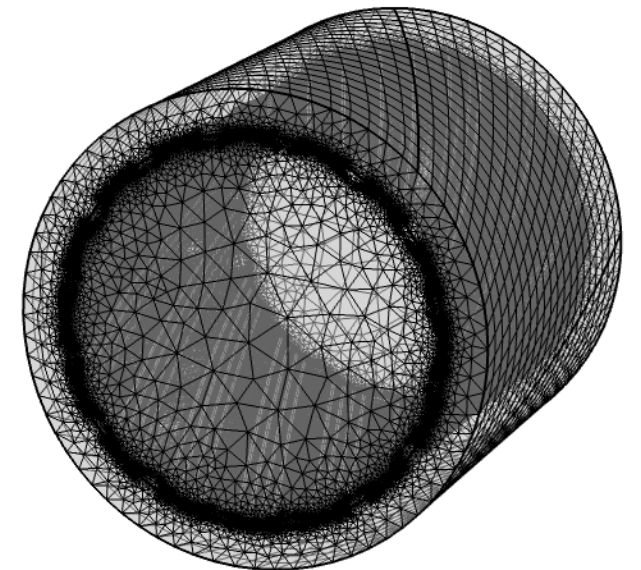


図10 超電導ケーブルの解析モデルのメッシュ

3. 研究結果と考察

① 多芯薄膜線材の解析

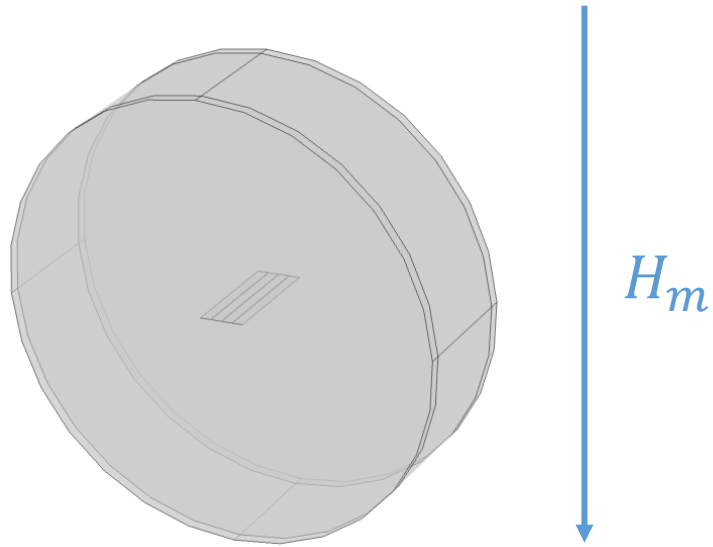
- (1) 分割数に関する解析結果
- (2) 線材の長さ依存性に関する解析結果

② 多芯薄膜線材より構成した2層超電導ケーブル

- (1) 通電損失特性に関する解析結果

①多芯薄膜線材の解析

(1) 分割数に関する解析結果



0.02 [T] 以上の磁界下で損失が低減。
高磁界下においては損失が1/N低減。

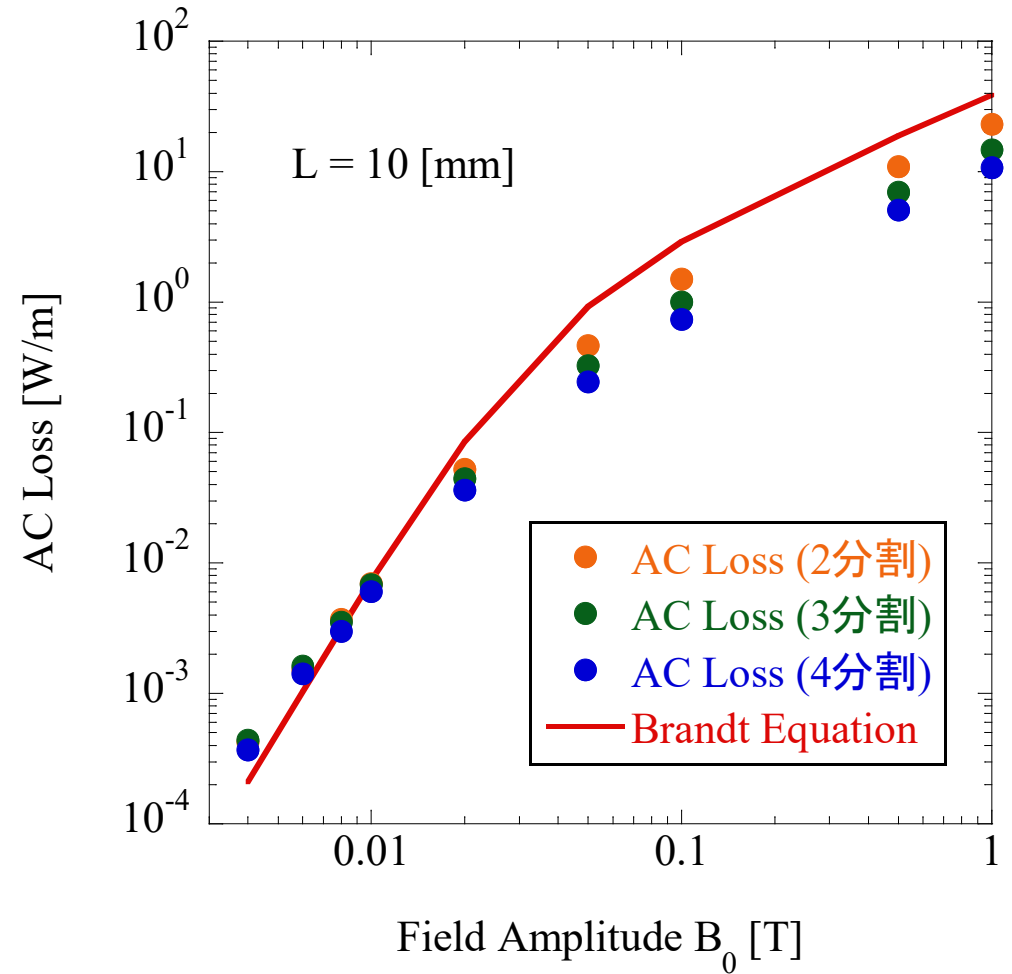
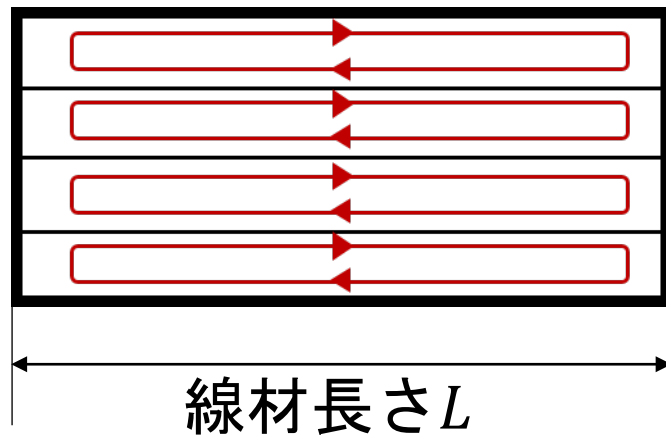


図11 多芯薄膜線材の磁化損失（分割数 $N=2\sim4$ ）

(2) 線材の長さ依存性に関する解析結果



10 [mm] 以上では損失が**わずかに低減**。
極端に短い場合に損失が**急激に低減**。

結合が切れるまでにかかる時間が損失に与える**影響は少ない**

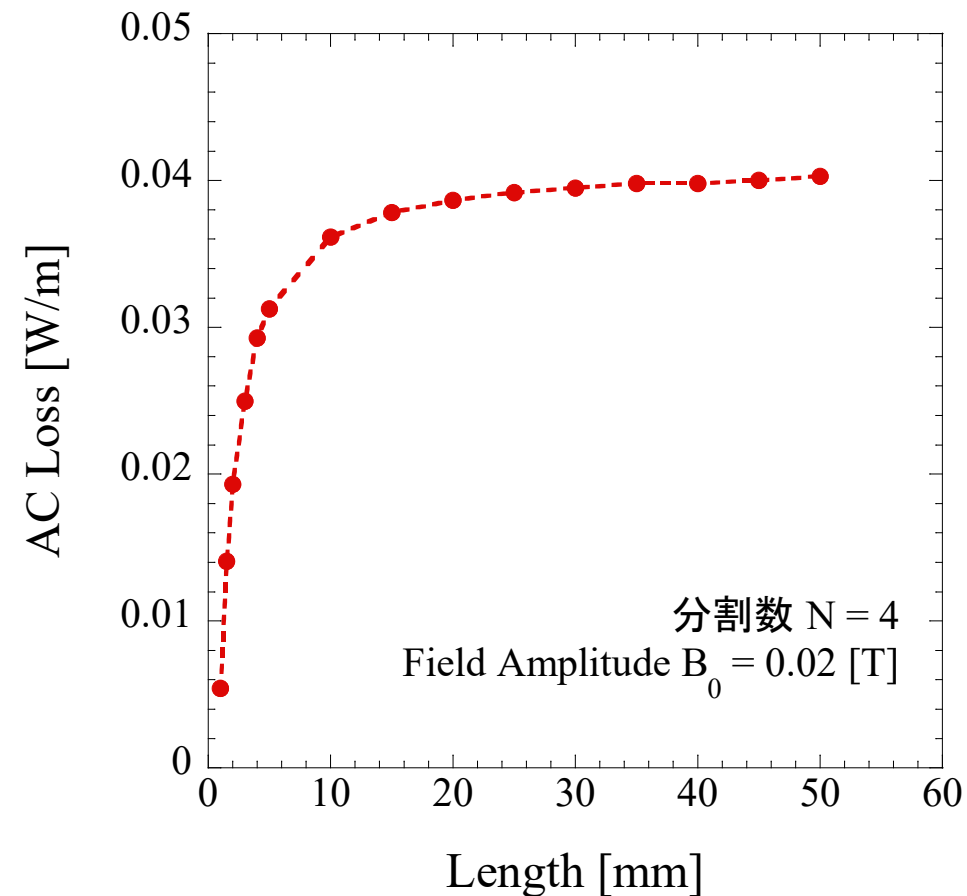
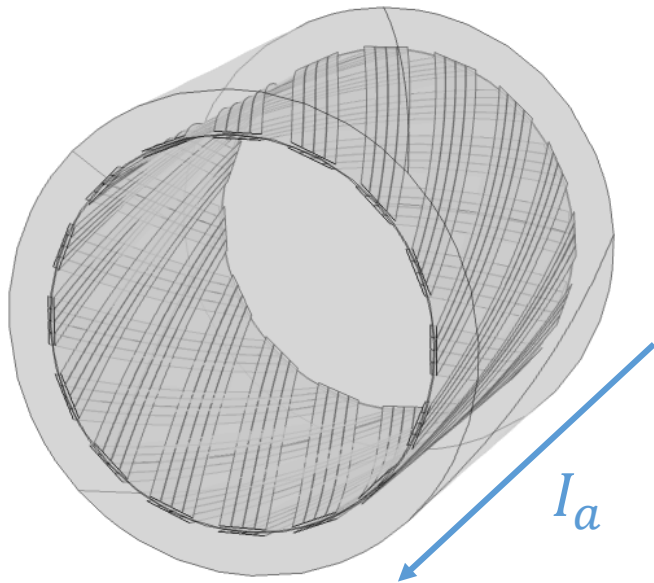


図12 多芯薄膜線材の線材長さ依存性

②多芯薄膜線材より構成した2層超電導ケーブル

(1) 通電損失特性に関する解析結果



損失が**低減**しており、規格化電流が大きくなるにつれ、損失の低減効果が**大きくなっている**。

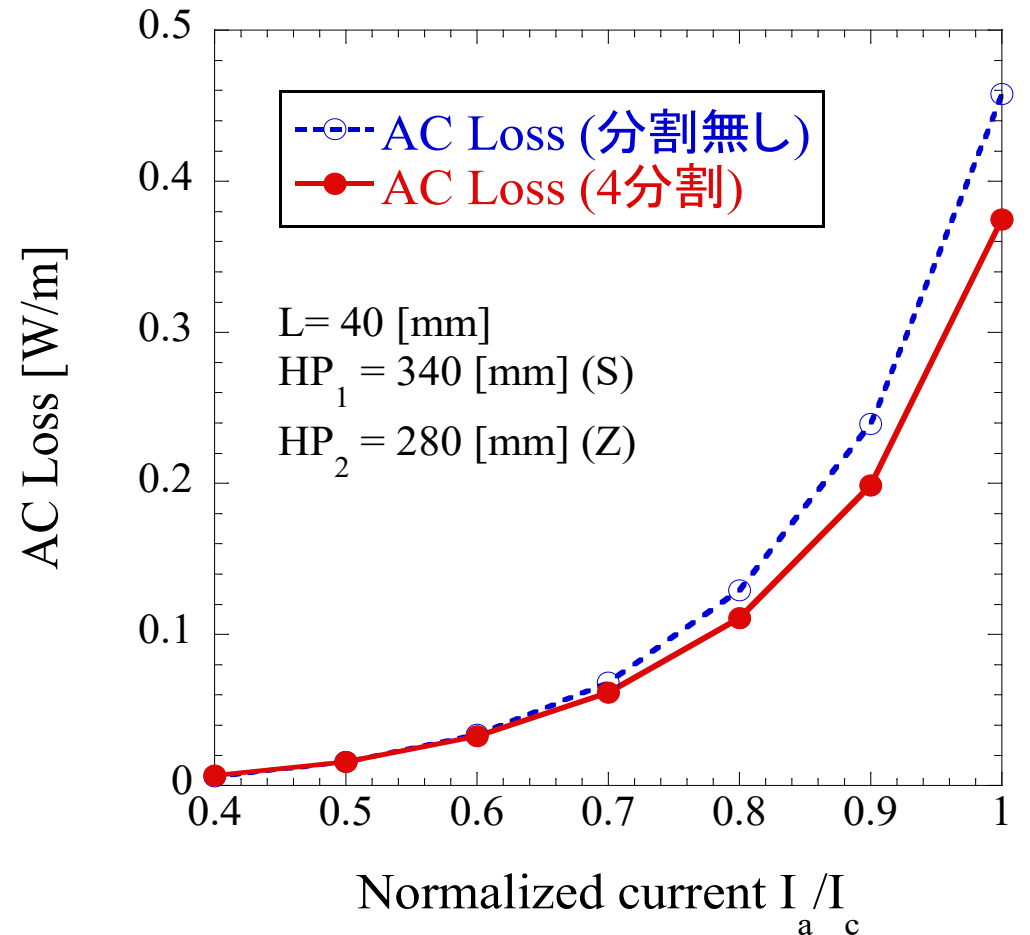


図13 2層超電導ケーブルの通電損失特性

4. まとめ

- ・多芯薄膜線材の解析結果より線材に垂直磁界を印加した場合の損失（磁化損失）は印加磁界が大きくなるほど損失低減効果が大きくなる。
- ・線材の線材長さ依存性に関する解析結果より電流ループの短縮による損失の低減効果はあまりないことが分かった。
- ・多芯薄膜線材より構成した超電導ケーブルの解析結果より通常の超電導ケーブルと比べて、損失が低減されることが分かり、高電流通電時により、損失が低減されることが分かった。

ご清聴ありがとうございました

交流損失が発生する理由

- ・ 通常の金属では渦電流損とヒステリシス損がある
- ・ 超電導体では抵抗がゼロであるため渦電流損は発生しないがヒステリシス損は磁気特性であるため発生し、これによりロスが生じる
- ・ ミクロな視点で考えると、超電導特有の効果であるピン止め効果によってピン止めされている磁束が、印加された交流磁界によって移動することになり、その磁束の移動によってロスが生じる

Norrisの方程式

$$Q_{NS} = \frac{I_c^2 \mu_0 f}{\pi} \{ (1 - i) \ln(1 - i) + (1 + i) \ln(1 + i) - i^2 \} \text{ [W/m]}$$

$i = I_1 / I_c$: 規格化電流

I_1 : 通電電流

I_c : 臨界電流

超電導テープの断面が楕円、薄膜の場合の
交流損失を計算できる。

2. 研究方法

(2) 2層目の巻き付けピッチ依存性に関する解析

超電導ケーブル（テープ16枚、 $P_1 = 340$ [mm]、 $L = 40$ [mm]）の2層目の巻き付けピッチを $P_2 = 150 \sim 450$ [mm]の間で変化させ、規格化電流に対する交流損失特性を解析



巻き付けピッチを短くすることにより
遮蔽電流ループの短縮

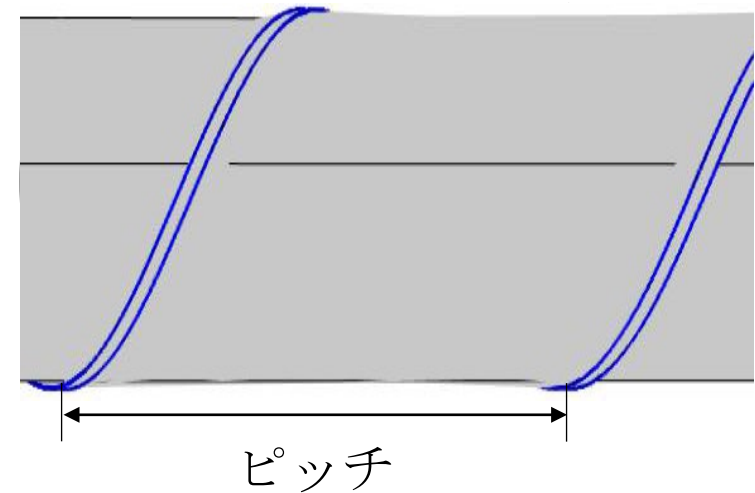


図11 超電導ケーブルを構成する
テープの巻き付けピッチ

3. 研究結果と考察

(2) 2層目の巻き付けピッチ依存性に関する解析結果

損失が低減しており、巻き付けピッチ依存性の変化はあまりない

巻き付けピッチを変化させることによって、電流ループの短縮を図ったが、損失に与える影響は少ないことが分かった

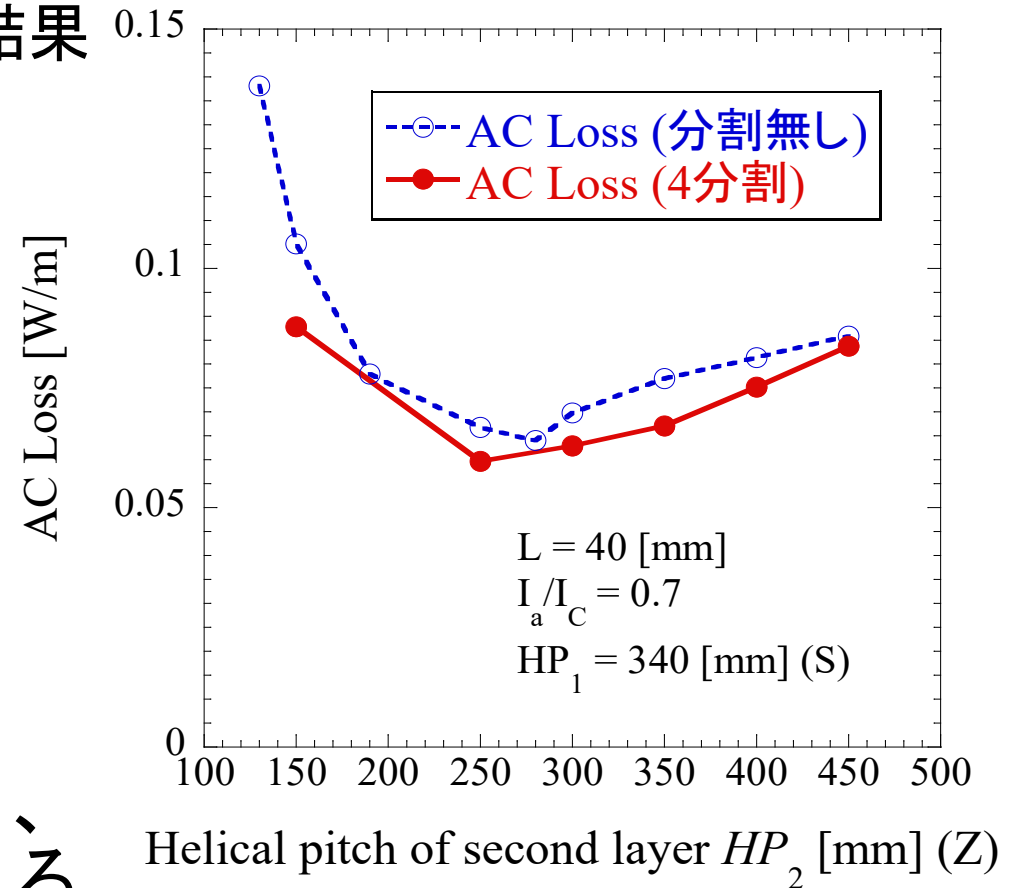


図15 2層目の巻き付けピッチ依存性

2. 研究方法

- ・有限要素法

有限要素法とは、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である。右図はケーブル導体の断面図でメッシュを切っている状態であり、この分割している小領域ごとに計算を行う。

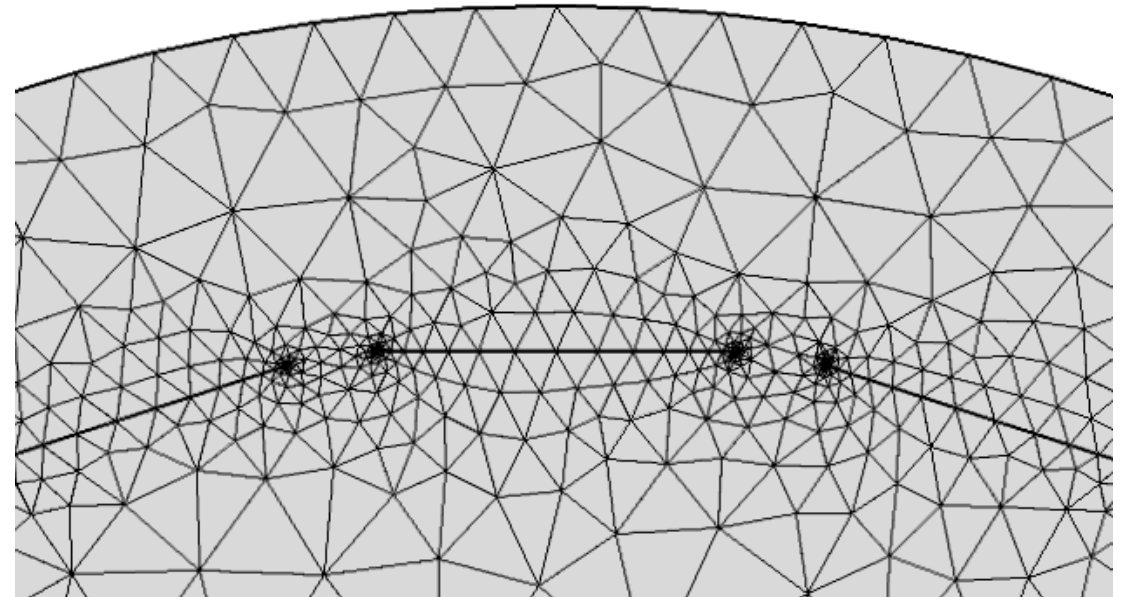


図3 超伝導ケーブルでメッシュを切っている様子