

YBCOテープから構成される多層超電導ケーブルの交流損失解析

都城工業高等専門学校 機械電気工学専攻

川野将太・野地英樹

(1) 諸言

生活の利便性の向上に伴うエネルギー需要の増加により、大都市における電力供給不足が予想され、また、火力発電などによるCO₂排出による地球温暖化も問題となっている。そこで、従来のケーブルよりも送電損失を大幅に低減することが可能である超電導電力ケーブルの早期実現が望まれている。

超電導ケーブルの実現には交流損失の低減が必要であり、そのために交流損失を超電導ケーブルの構成パラメータから数値的に解析することが求められている。従来の交流損失の算出は、層電流に依存する抵抗 R_m 、周方向磁界 B_{cm} によるインダクタンスと軸方向磁界 B_{am} によるインダクタンスの3回路素子より構成される電気回路モデルにより行っていた（従来法）。しかし、従来法では、層電流の算出において収束計算が必要であり、収束するまでに時間を要する。本研究は、従来の電気回路モデルから抵抗 R_m を省略しインダクタンス L_{cm} とインダクタンス L_{am} のみから構成される電気回路モデルとすることで、収束計算を必要とせず短時間で容易に電流分布を解析して交流損失を算出する方法を提示する（新規法）。

■超電導ケーブルの構造

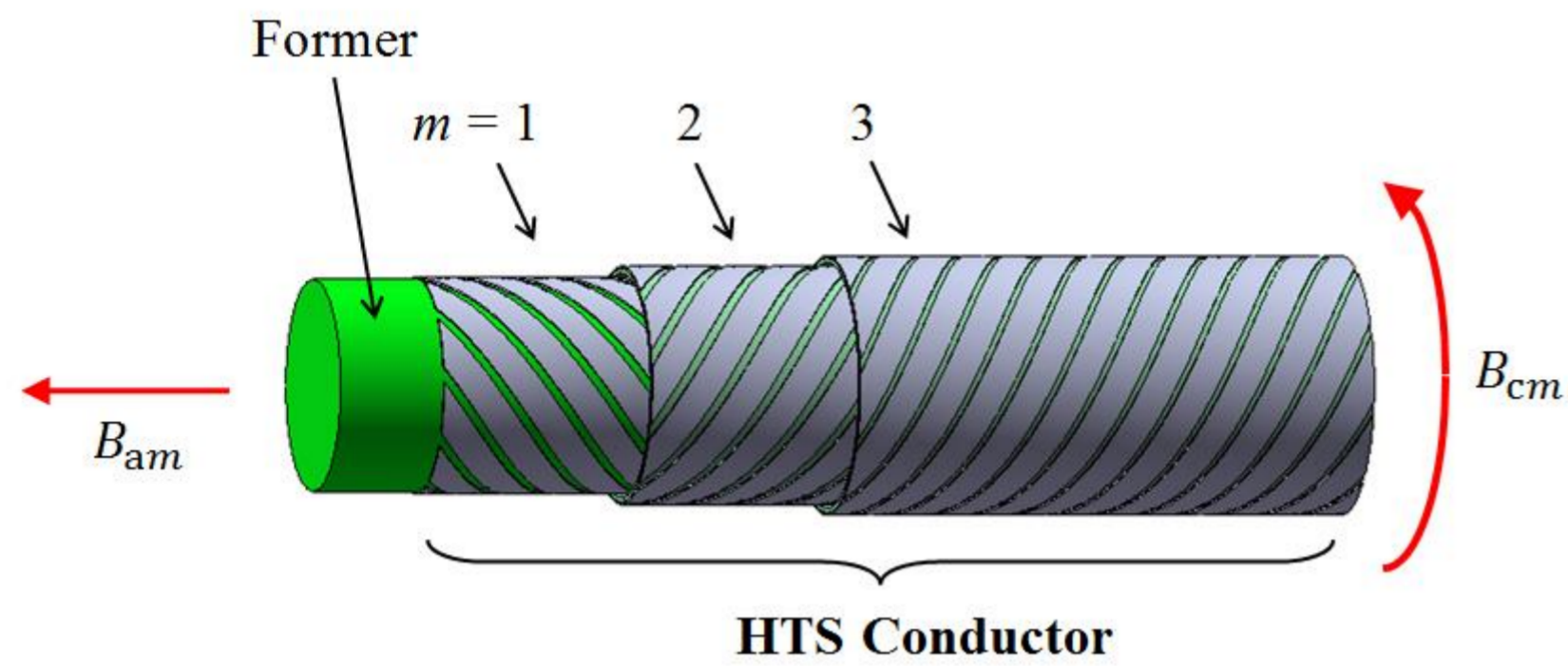


図1 超電導ケーブルの構造

YBCO超電導テープによって構成された超電導ケーブル導体を図1に示す。超電導ケーブル導体は、フォーマと呼ばれる芯材に超電導テープを複数層巻き付けて構成されている。本研究における超電導層は3層である。超電導ケーブルの構成パラメータは表1に示す。

■従来の電気回路モデル

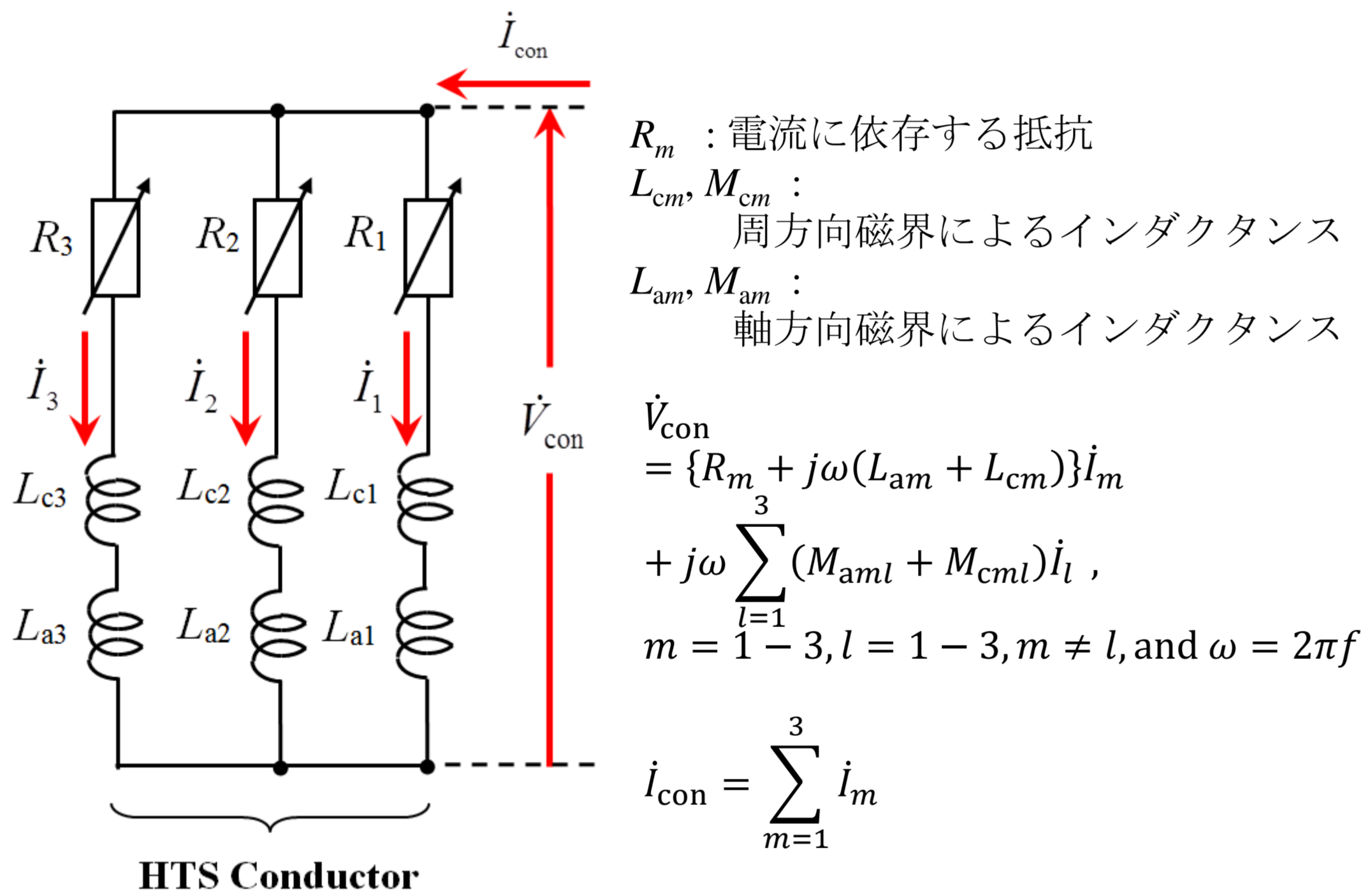


図2 従来の電気回路モデル

■新規の電気回路モデル

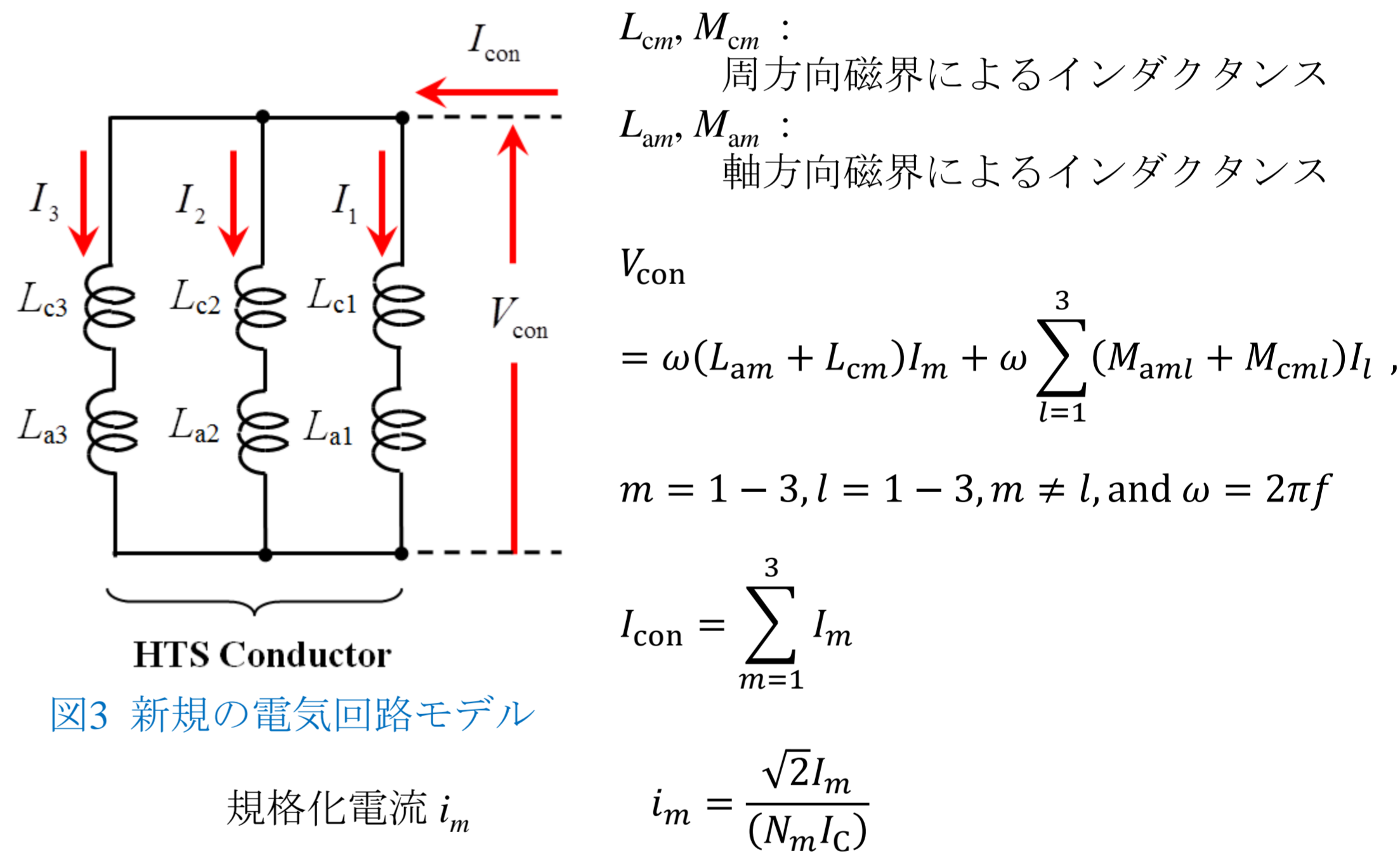


図3 新規の電気回路モデル

規格化電流 i_m

Norrisの式

$$P_m = \frac{I_C^2 \mu_0 f}{\pi} \{ (1 - i_m) \ln(1 - i_m) + (1 + i_m) \ln(1 + i_m) - i_m^2 \}$$

(2) 交流損失の計算

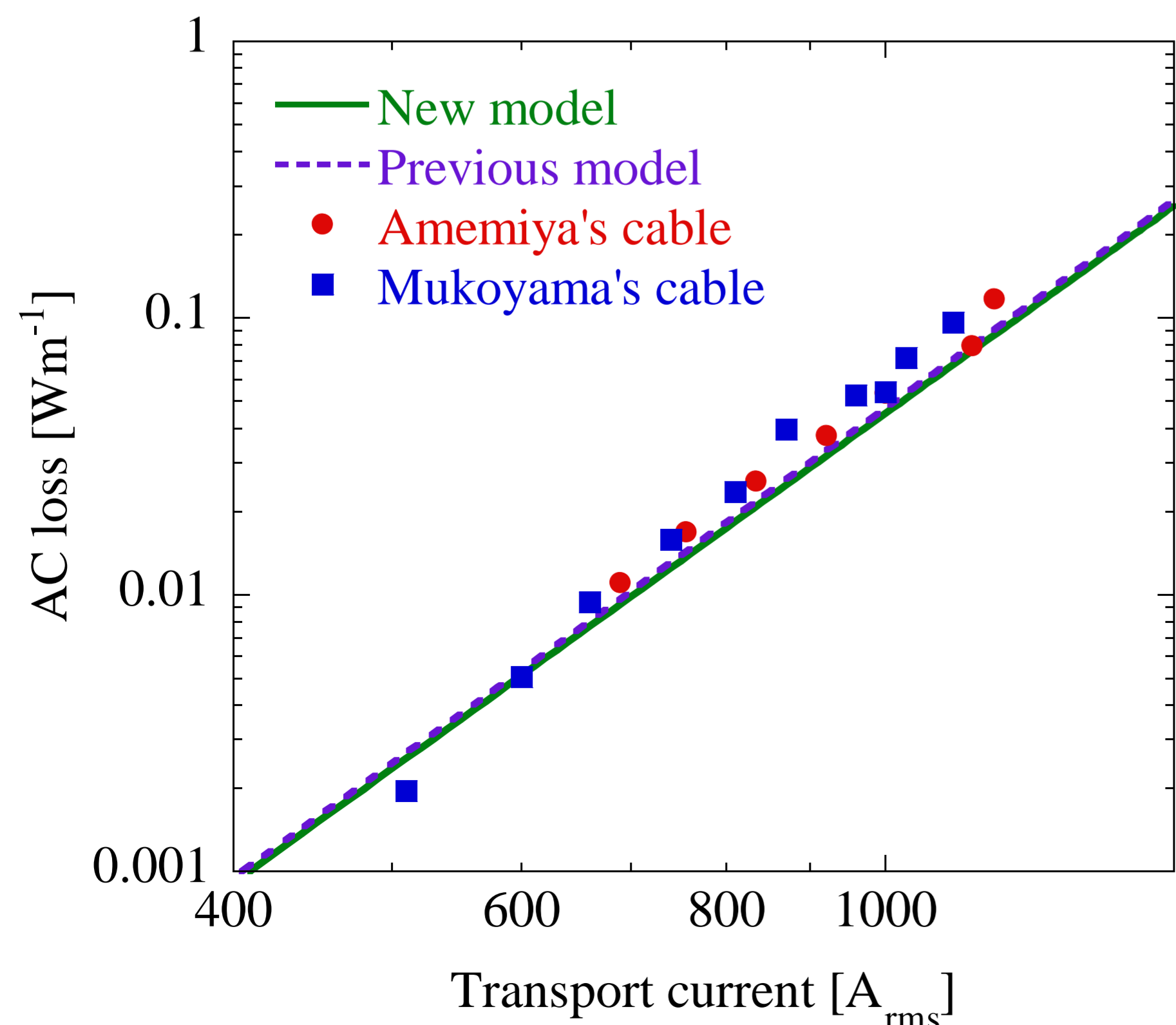


図4 通電電流に対する交流損失

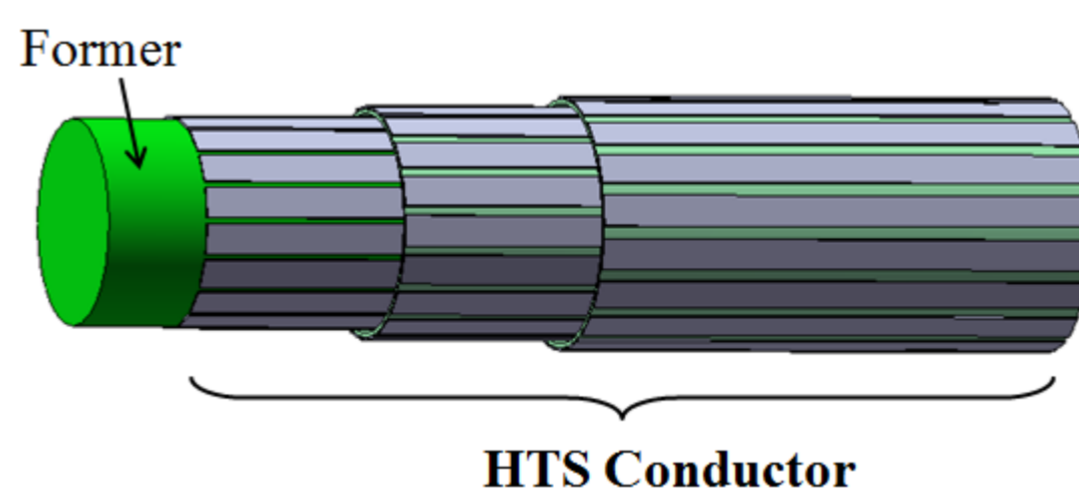


図5 雨宮ケーブル

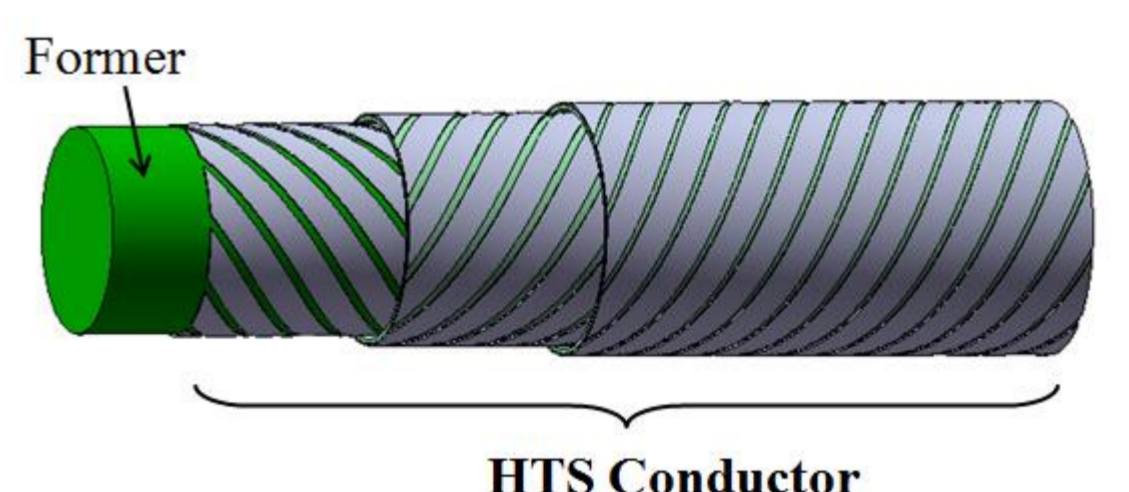


図6 向山ケーブル

図中の丸印は横浜国立大学の雨宮教授のグループが製作したケーブル（雨宮ケーブル）を4端子法で測定した交流損失であり、四角印は古河電工の向山氏のグループが製作したケーブル（向山ケーブル）を同様に測定した交流損失である。雨宮ケーブルは、超電導テープをケーブルの軸に平行に配置してある（図5）。このケーブルは各層が直列に接続されているため、同一の通電電流が全ての層に流れている。一方、向山ケーブルは超電導テープを心材に対して螺旋状に巻き付けて配置している（図6）。各層の巻き付け方向と各層の巻き付けピッチは発表されていない。

雨宮ケーブルと向山ケーブルの交流損失の測定結果は一致している。この結果は、向山ケーブルでは、超電導テープを心材に対して螺旋状に巻き付けて配置することで全層の通電電流値を均一にしていることを示している。

表1 超電導ケーブルの構成パラメータ

1層目の半径 r_1	8.65 mm
2層目の半径 r_2	8.95 mm
3層目の半径 r_3	9.60 mm
仮想シールドの半径 r_s	30 mm
1層目のテープ数 N_1	27 本
2層目のテープ数 N_2	28 本
3層目のテープ数 N_3	30 本
1層目のピッチ p_1	0.809 m (S)
2層目のピッチ p_2	0.947 m (Z)
3層目のピッチ p_3	0.112 m (Z)
超電導テープ幅 w_{id}	1.8 mm
超電導テープ厚 d	1.4 μ m
超電導テープの臨界電流 I_c	25.68 A
通電電流の周波数 f	50 Hz

図4の実線が新規法で算出した交流損失であり、破線が従来法によるものである。新規法および従来法の計算結果と測定結果の交流損失特性は定性的に一致するが、通電電流1 kA_{rms}において定量的にそれぞれ16%、12%の誤差がある。

従来法において、電圧と電流の関係が非線形であるにもかかわらず複素数で記述しても計算結果と測定結果がほぼ等しくなるのは、 R_m が次式で表すリアクタンス X_{Lm} に対して十分小さいためであると考えられる(表2)。

$$X_{Lm} = \omega(L_{am} + L_{cm})$$

表2 抵抗 R_m とリアクタンス X_{Lm} の比較

第 m 層	巻き付けピッチ p_m [m]	抵抗 R_m [Ω]	リアクタンス X_{Lm} [Ω]
1	1.384	1.47E-07	7.82E-05
2	0.707	1.42E-07	7.62E-05
3	0.112	1.38E-07	8.07E-05

新規法および従来法における誤差は、超電導テープ1本あたりの交流損失 P_m を算出する際、Norrisの式を用いた点であると考えられる。このNorrisの式は超電導テープが独立して存在する場合に適用された式である。超電導ケーブル導体では、超電導テープが近接して配置しており、超電導テープ間の相互作用を考慮しなければならない。この場合には、有限要素法を用いて磁界分布を解析し、磁界による交流損失を求める必要がある。

次に計算時間について示す。従来法では抵抗 R_m が層電流 I_m に依存するため、 I_m を決定するために連立方程式の収束計算を行う必要がある。新規法では、連立方程式を1度解くだけで I_m を決定できるので、短時間で計算することができる。最適ピッチを算出するため、PCで100回のループ計算を実行したところ、新規法は従来法の20分の1の時間で計算が終了した。

(3) 交流損失を最小化する超電導ケーブルの設計法

表3 各巻き方向に対する最小交流損失と最適ピッチ

巻き方向	AC loss [Wm^{-1}]	p_1 optimum [m]	p_2 optimum [m]	p_3 optimum [m]
SZZ	0.0452	0.809	0.947	0.112
SZS	0.225	0.069	0.072	0.077
ZZS	0.0452	0.114	0.522	0.077
SSS	0.0452	0.839	0.367	0.117

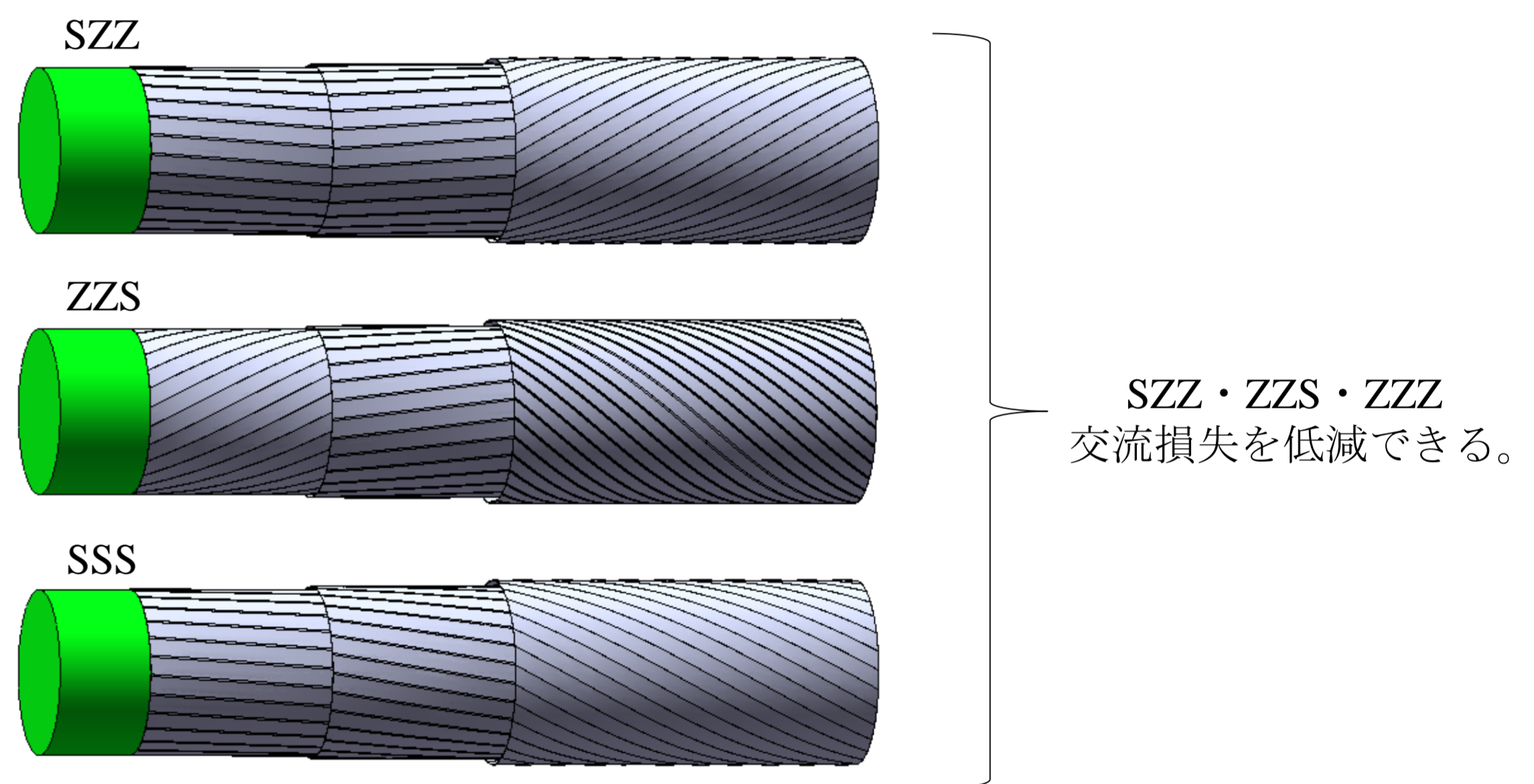
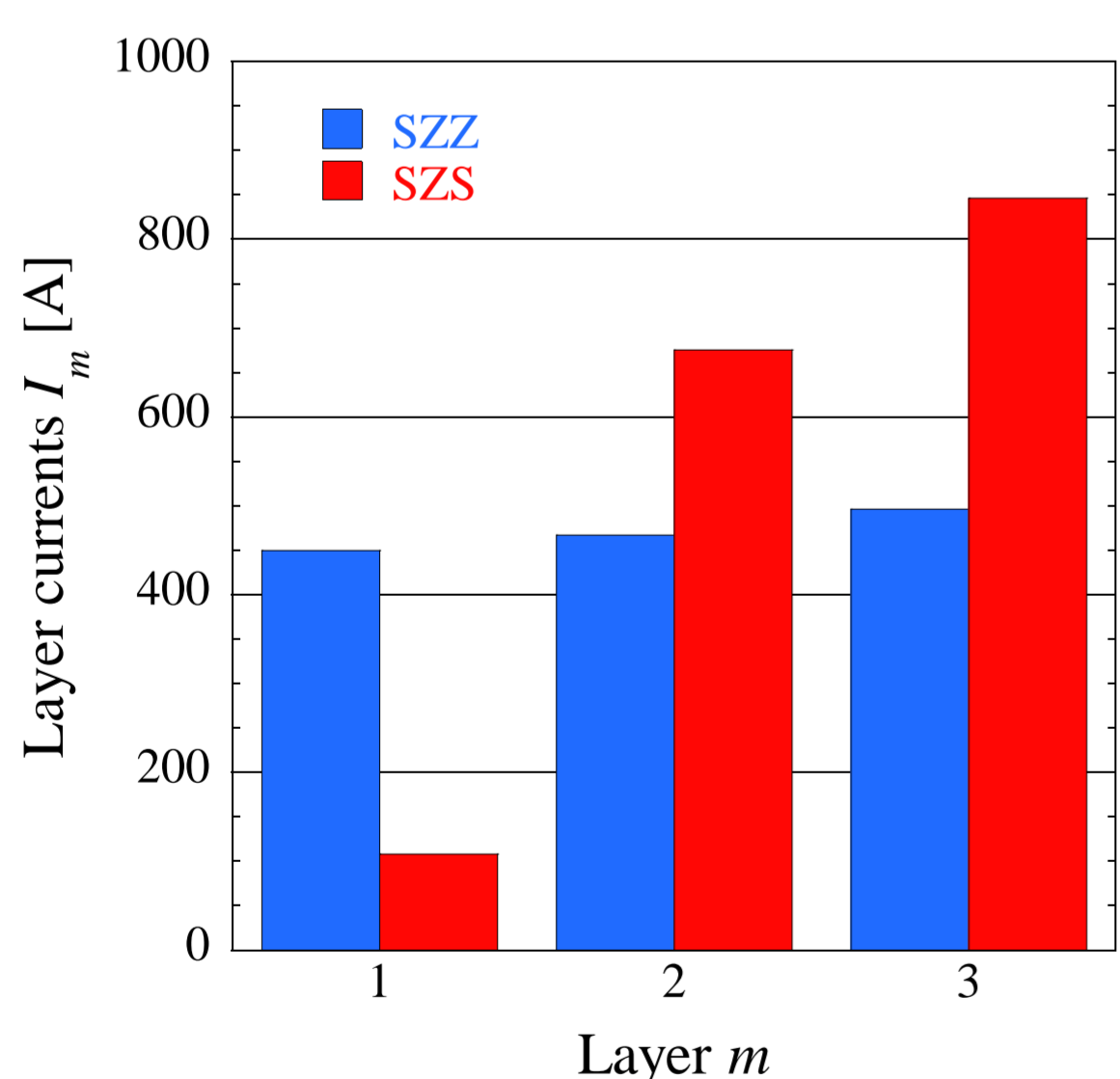
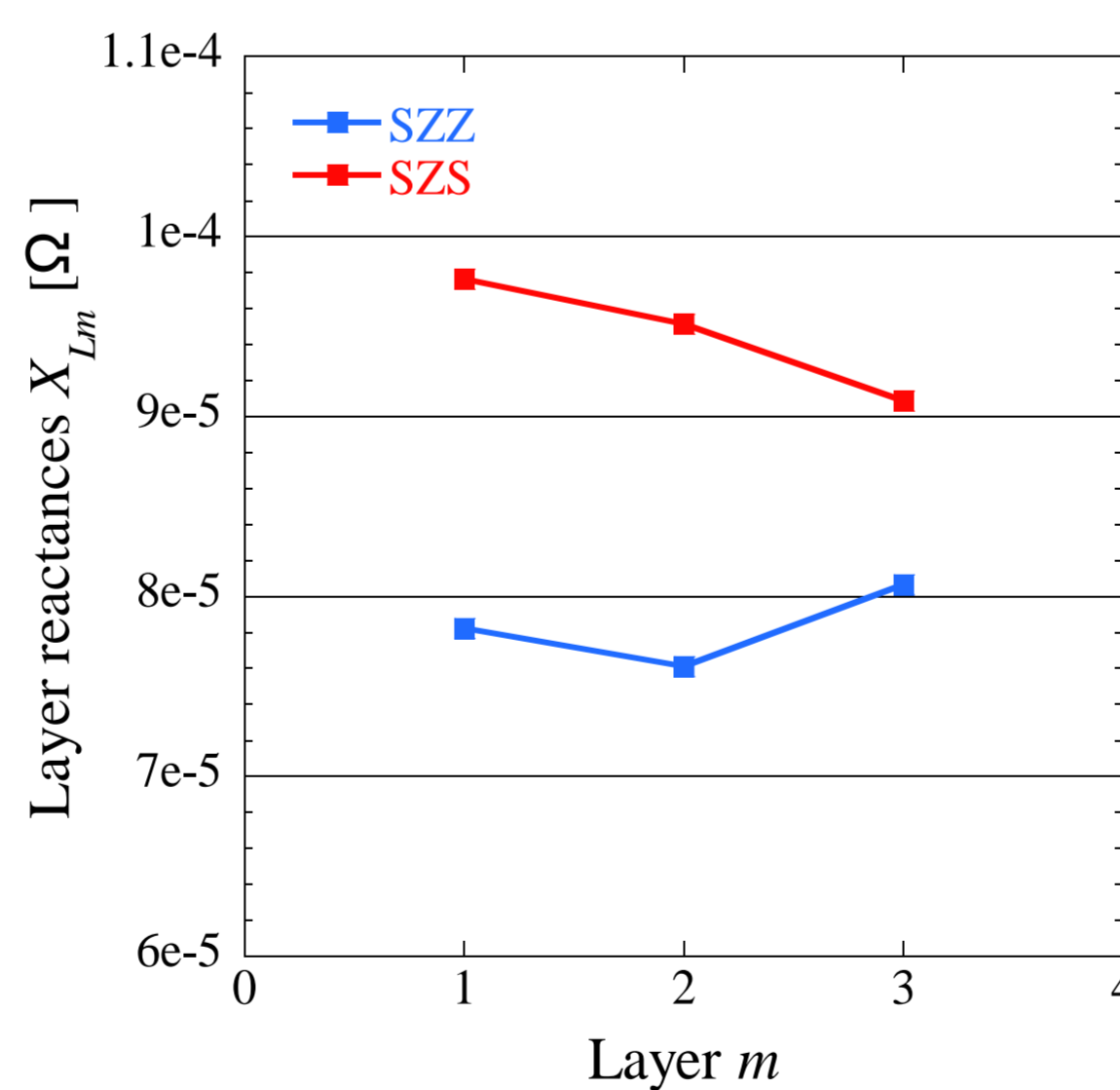


図7 最適ピッチ



(a) 層電流 I_m



(b) リアクタンス X_{Lm}

図9 SZZとSZSの比較

巻き付け方向がSZZとSZSの各層の電流分布を示すと図9 (a)となる。SZZは各層の電流分布が均一になっているのに対し、SZSは外層に大きな電流が流れ、偏流が生じている。SZZとSZSのリアクタンス X_{Lm} の比較を図9 (b)に示す。SZZのリアクタンス X_{Lm} は外層で大きくなっているのに対し、SZSのリアクタンス X_{Lm} は外層で小さくなっている。SZSでは外層ほどリアクタンス X_{Lm} が小さいので大きな電流が流れ、各層の電流分布が均一にできなかったことが分かる。これにより、SZSでは交流損失が低減できなかった。

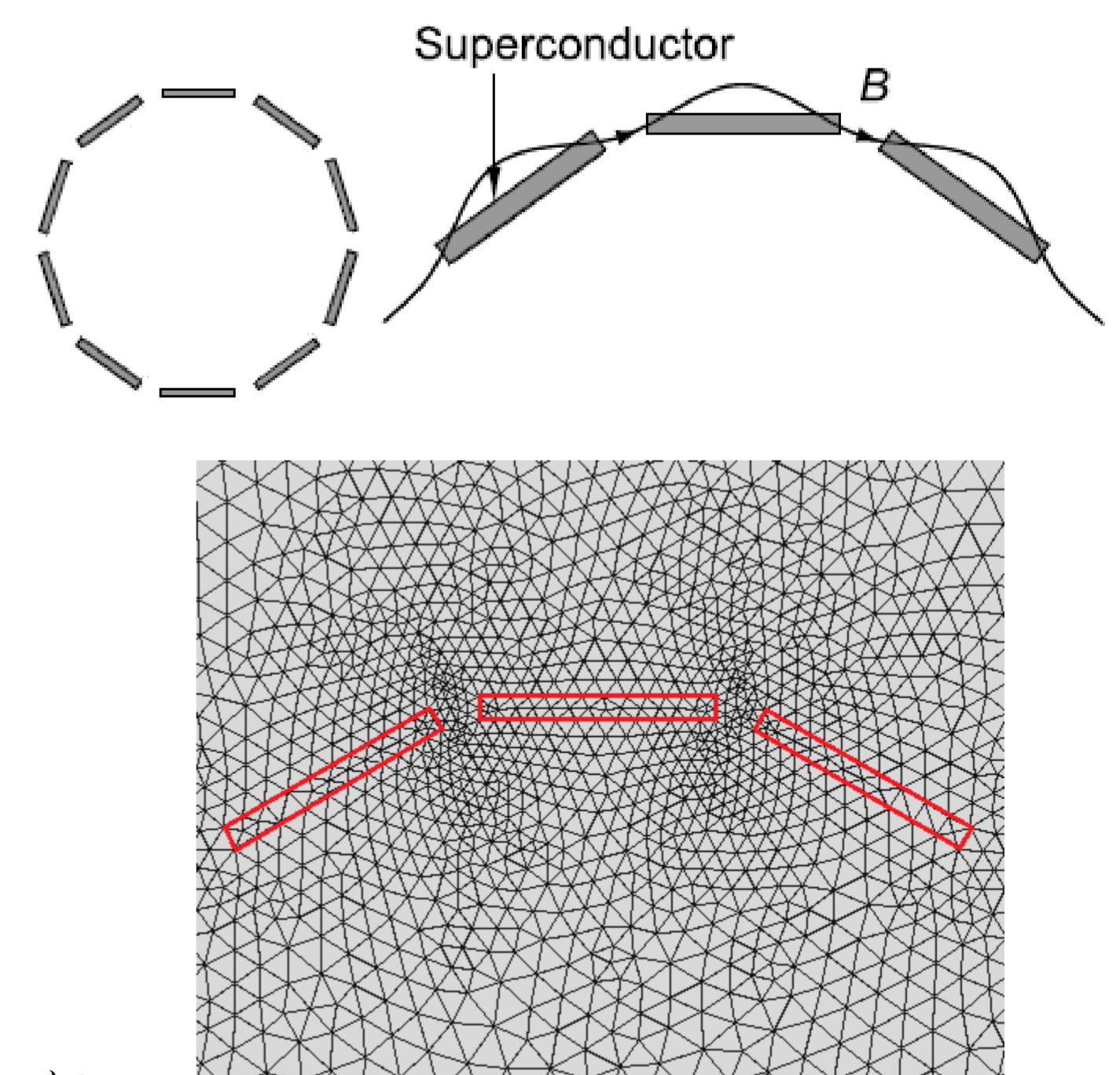


図10 有限要素法による解析

(4) 結論

本研究では、従来法から R_m を省略して新規モデルを提案した。このモデルにより計算した結果は、従来法による計算結果とほぼ一致した。新規モデルは収束計算を含まないため計算過程が簡単である。このため、新規法に有限要素法を取り入れる際、計算が簡単化できる。今後の課題として、従来法および新規法でも交流損失の計算結果には定量的な誤差があったため、有限要素法を導入して超電導テープ間の相互作用を考慮した解析を行う必要がある(図10)。