

単層CORC超電導ケーブルの交流損失の解析

都城高専専攻科 機械電気工学専攻, 宮崎885-8567
公文麻人、野地英樹

概要

本研究では有限要素解析ソフトCOMSOLを使用し、単層CORC超電導ケーブルの交流損失の解析を三次元電磁界解析によって行った。この解析において作成したケーブルのモデルのパラメータはSolovyovらの測定に使用されたケーブルを参考にした。このCORC超電導ケーブルは高磁場が印加される分野への応用が期待されているため、通電させた場合のみでなく磁界を印加した場合についても解析を行った。この研究によって、通電時に超電導テープを螺旋状に巻き付けた場合でも巻き付けなかった場合でも交流損失に変化はなく、どちらもノリスの式による計算値と一致することがわかった。また、磁界印加時において大きな磁界を印加する場合はメッシュを細かくしても粗くしても交流損失の解析結果にほぼ変化が現れないことがわかった。

ケーブルの設定

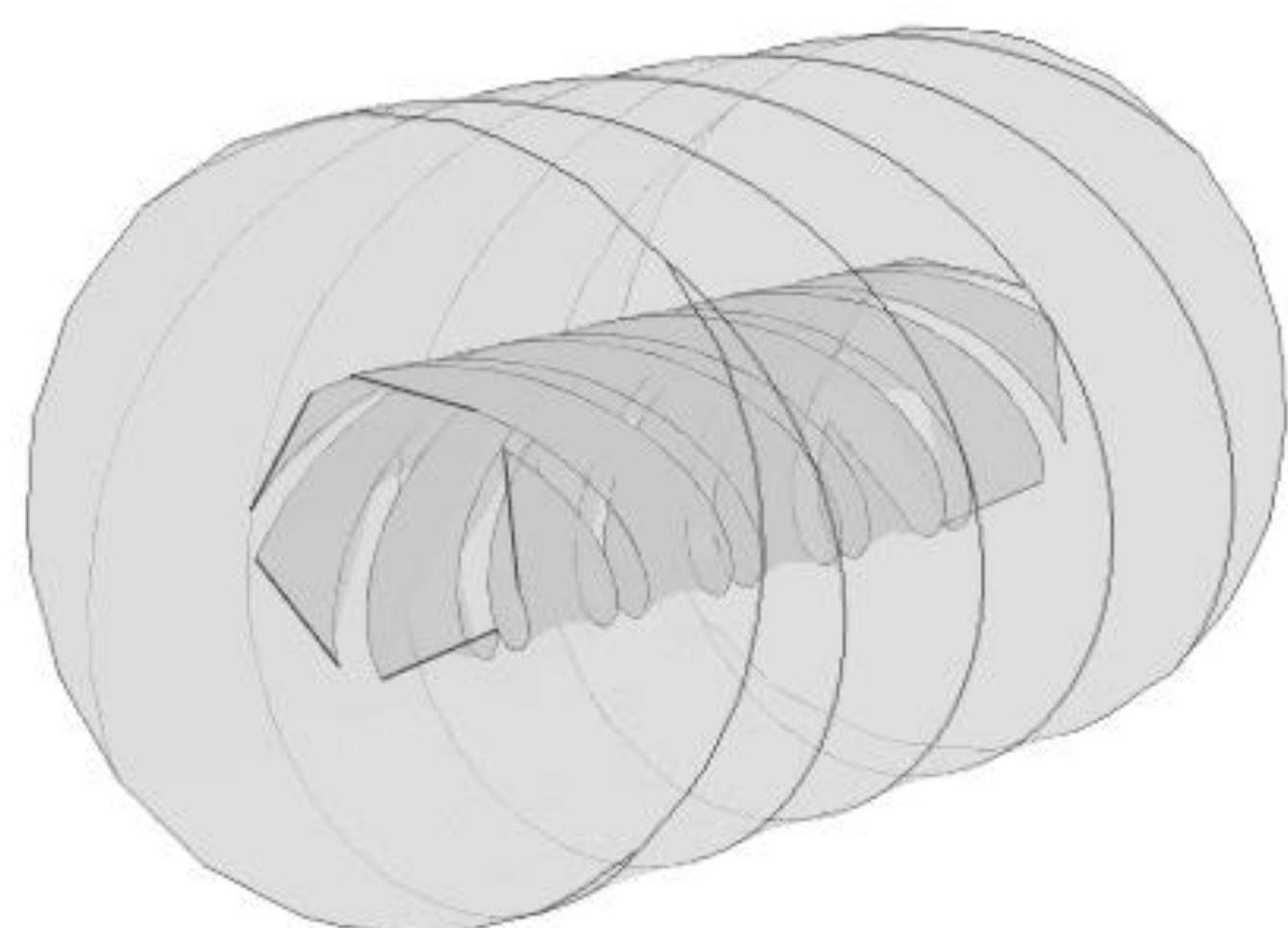


図1. 単層CORC超電導ケーブルの三次元モデル

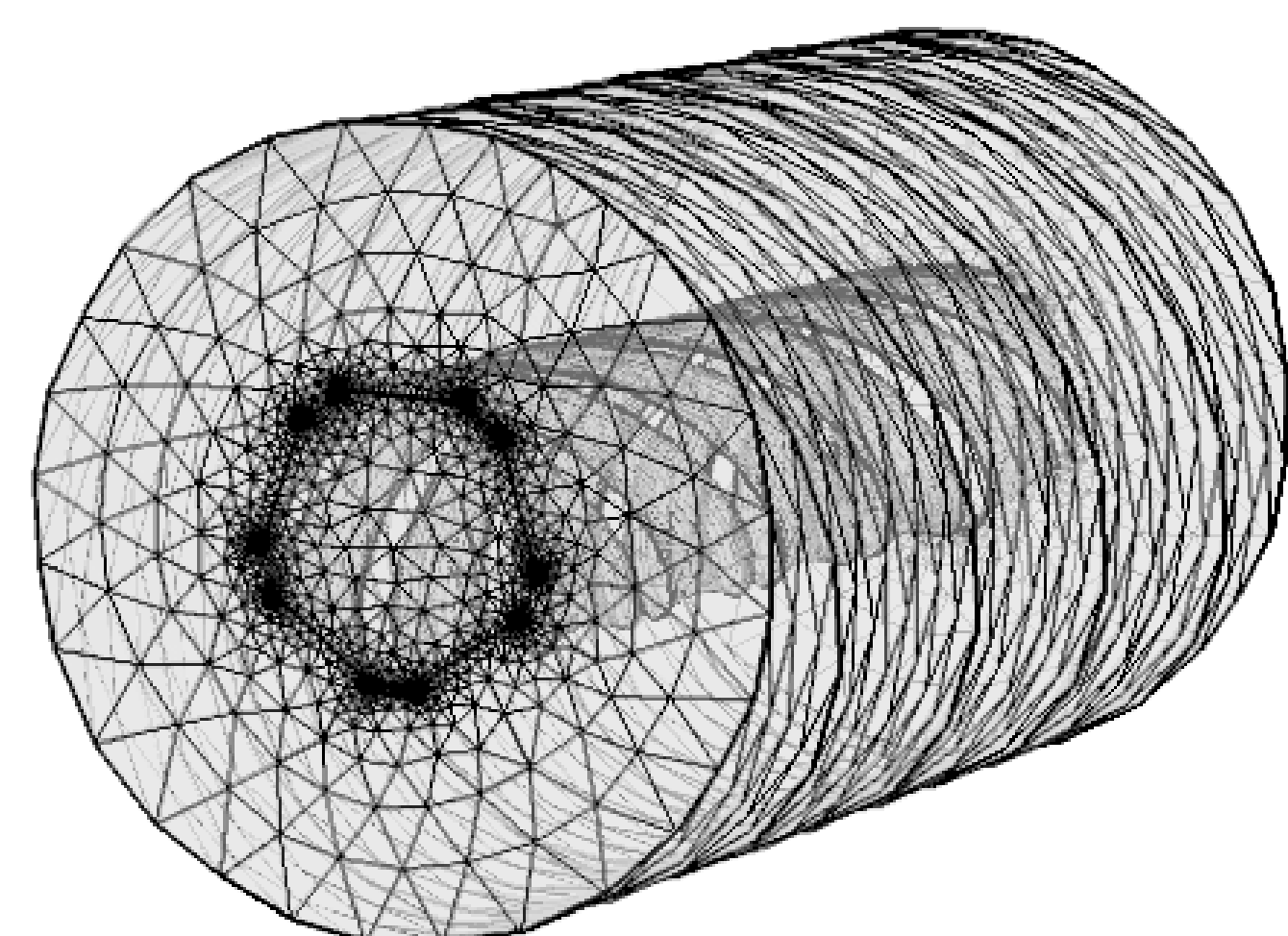
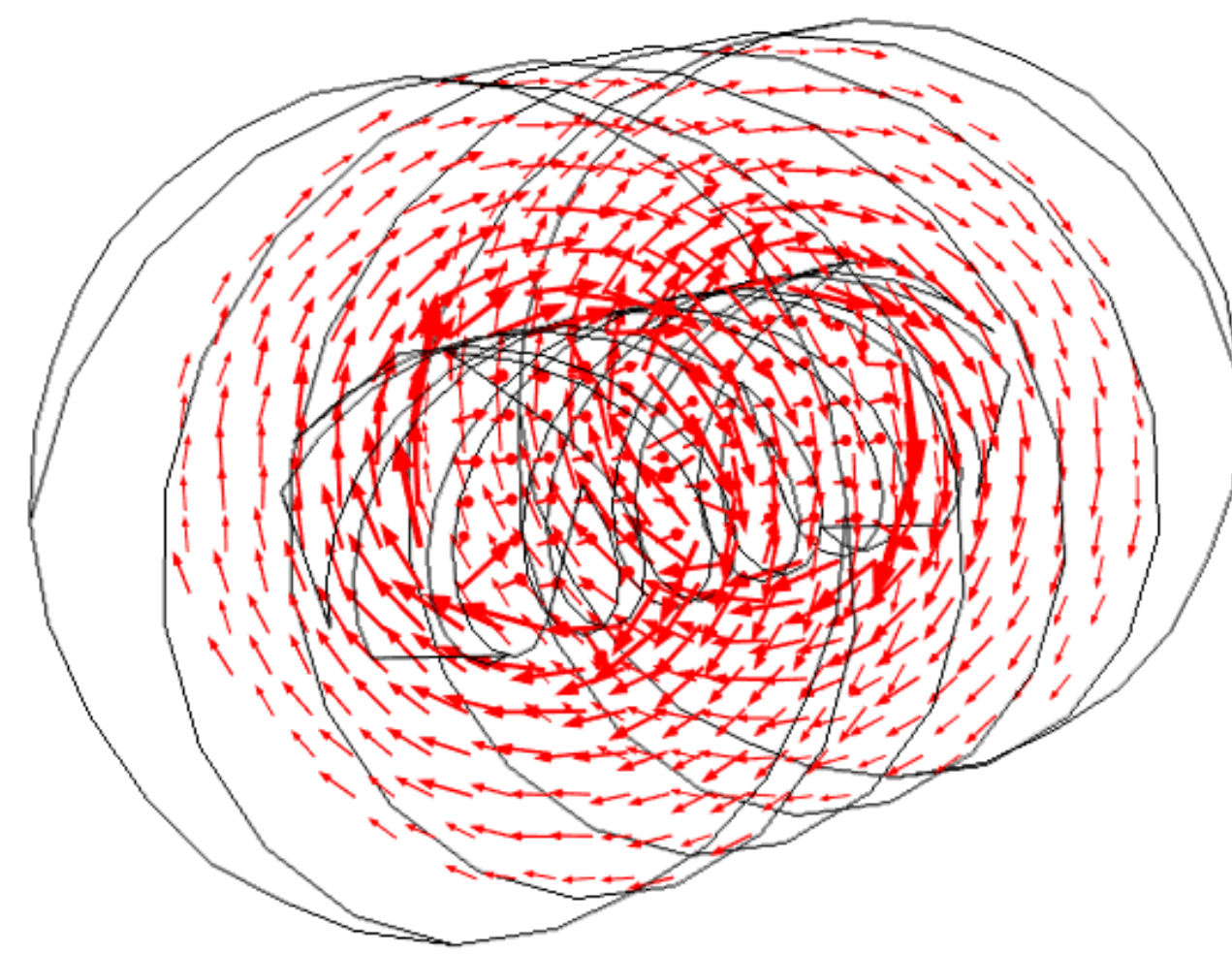
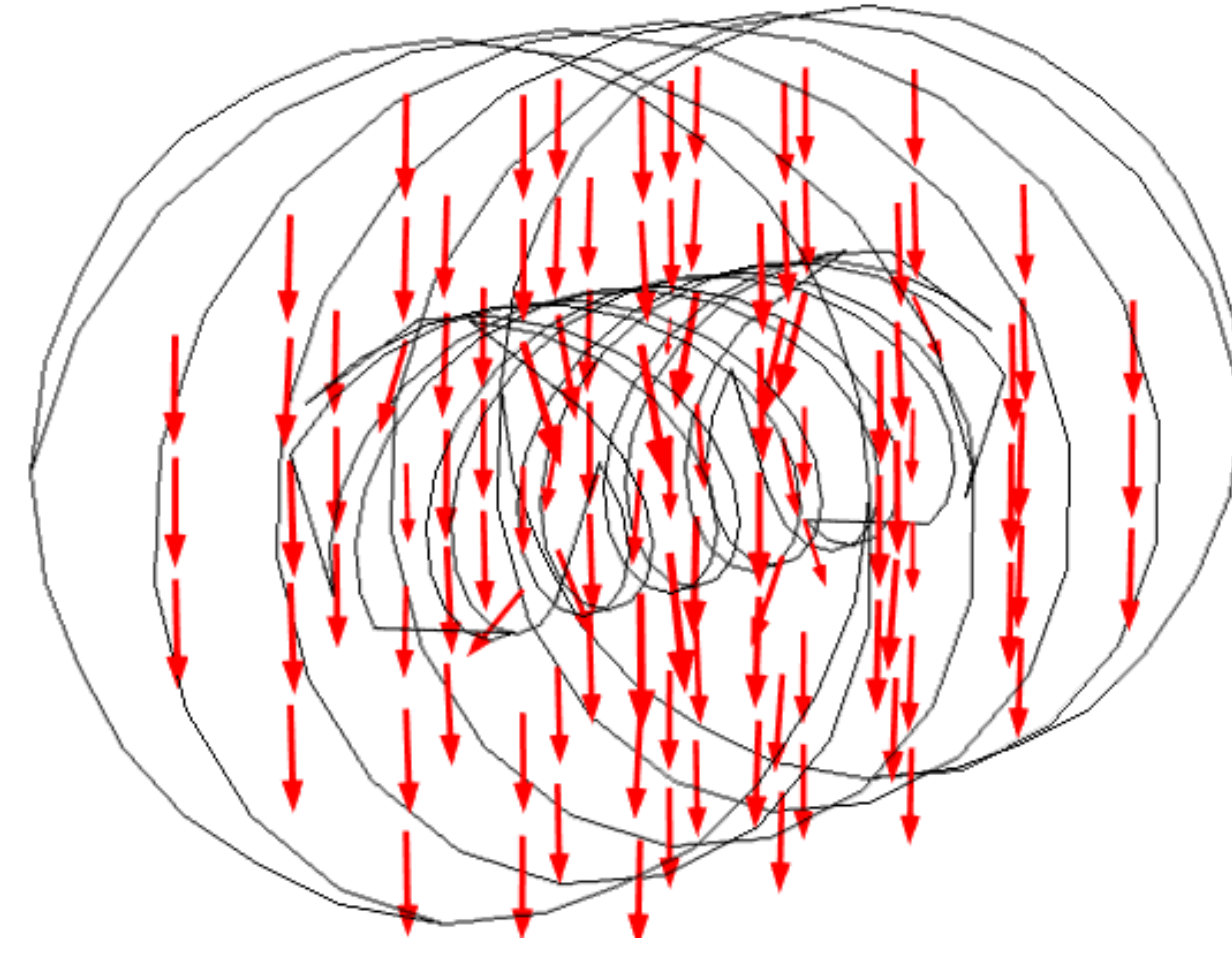


図2. メッシュを切ったときの様子



(a)電流通電時



(b)磁界印加時

図3. ケーブル周辺の磁界の様子

表1. 単層CORC超電導ケーブルの設定パラメータ[1]

テープ幅	4 mm
テープ厚さ	1 μm
ケーブルの直径	8 mm
ケーブル長さ	40 mm
テープ枚数	5
臨界電流値	565 A
巻き付けピッチの長さ	40 mm



図4. 単層CORC超電導ケーブル[1]

方程式

本研究では三次元電磁界解析を行うため、解析する際に使用する方程式は以下に示すように三次元に拡張して使用する

$$\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0$$

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H}$$

$$\mathbf{E} = \rho_{sc}(\mathbf{J})\mathbf{J}$$

$$\rho_{sc} = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n-1}$$

$$\text{実際に交流損失を求めるときに使用する式: } Q = f \cdot \int_{\frac{1}{f}} dt \iint_S E(\mathbf{J}) \cdot \mathbf{J} dS \text{ [W/m]}$$

これらの式を
三次元に拡張すると

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

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

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

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

印加磁界特性

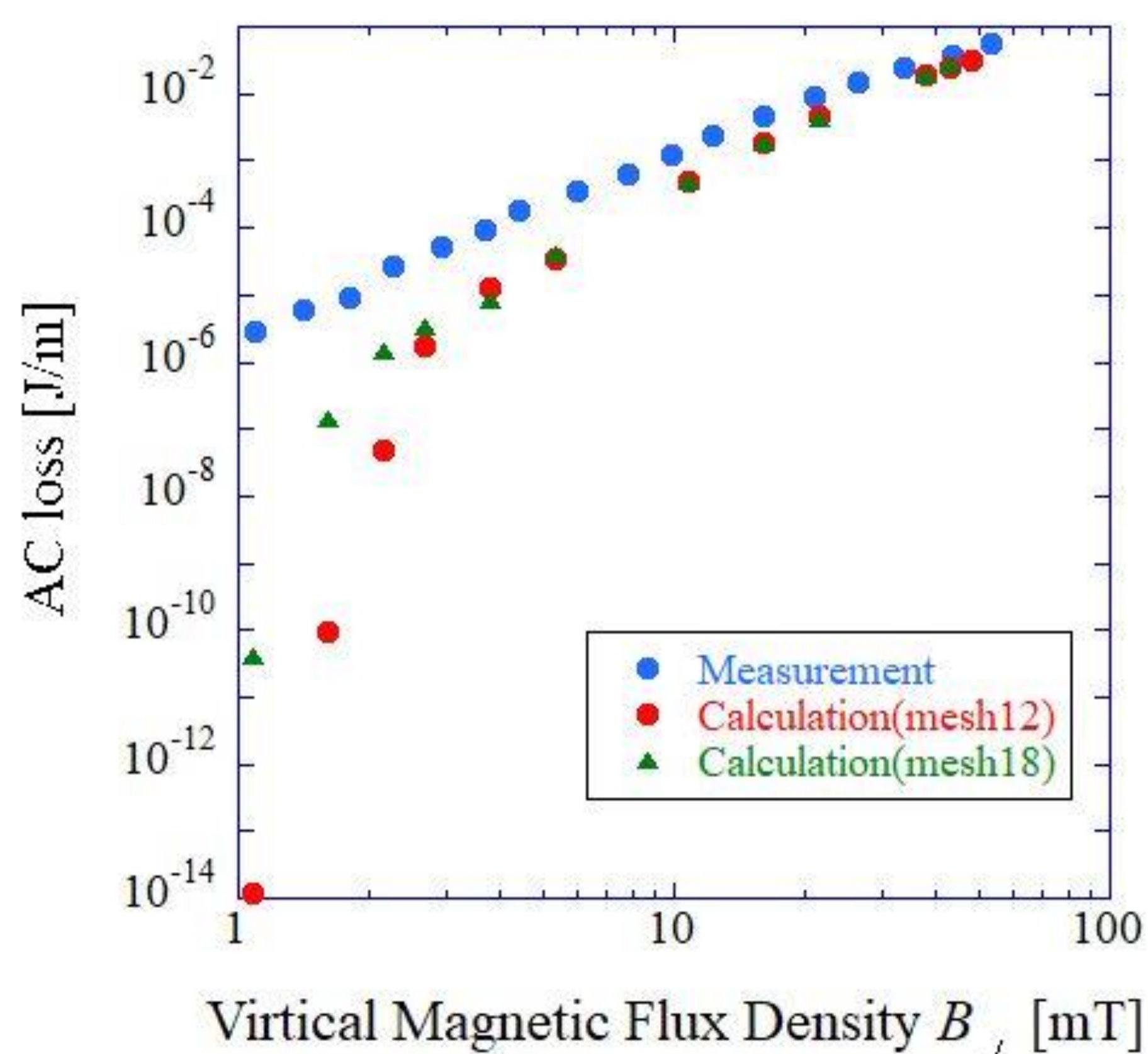


図6. 超電導ケーブルに磁界を印加したときの交流損失

まず、高い磁界を印加した場合において、メッシュを細かくした場合の結果とメッシュを粗くした場合の結果を比較するとほぼ一致した。このことから、シミュレーション時間を短縮するためにメッシュは粗めにしておくことがわかった。

一方、COMSOLによる解析結果をSolovyov等の測定結果と比較すると全体的に交流損失が低く算出されていることがわかる。これも、ケーブルのモデルを作成する際に、「肩」と呼ばれるテープ端部での臨界電流値の減衰を考慮できていなかったことが原因だと考えられる。

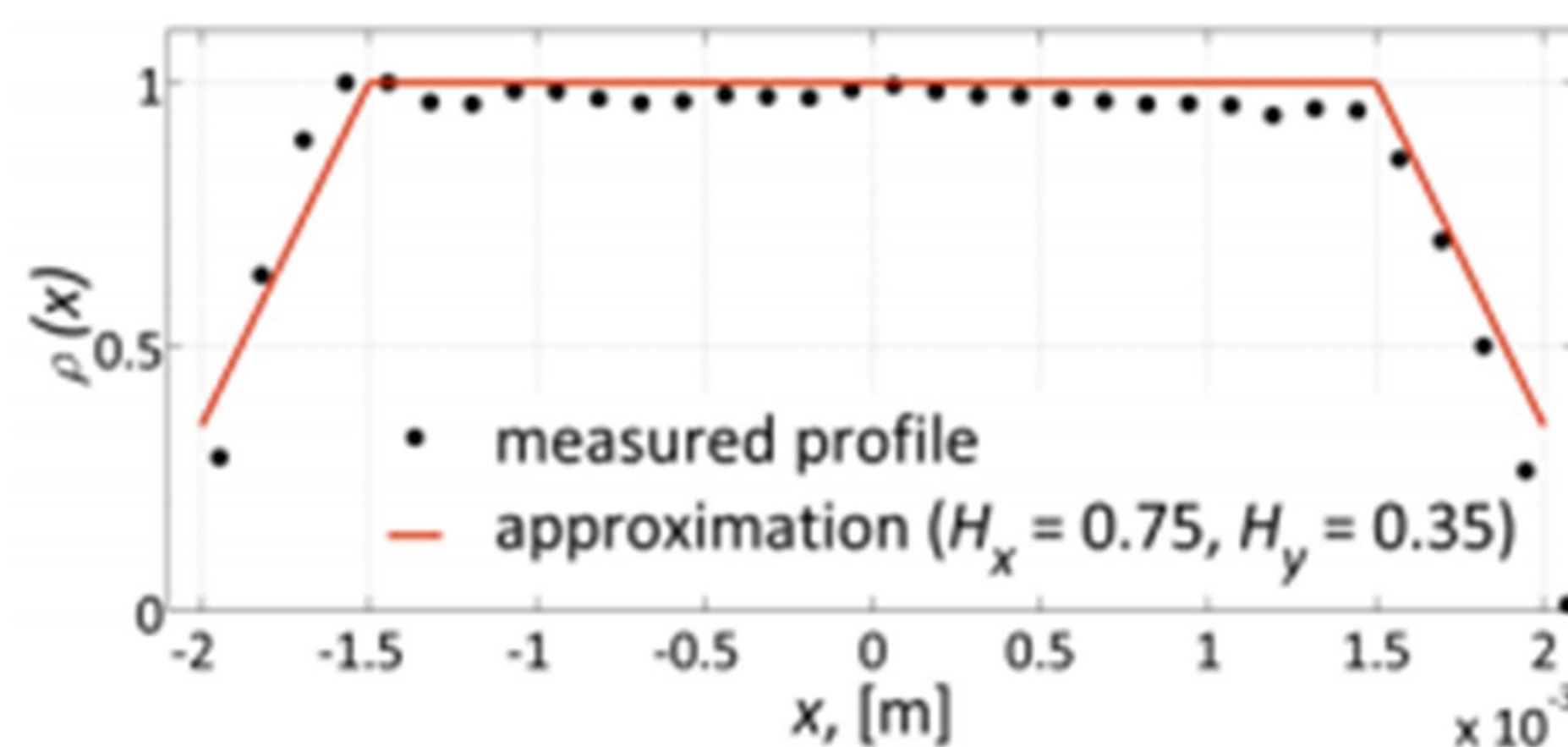


図7. 超電導テープ端部での臨界電流値の減衰「肩」[1]

通電電流特性

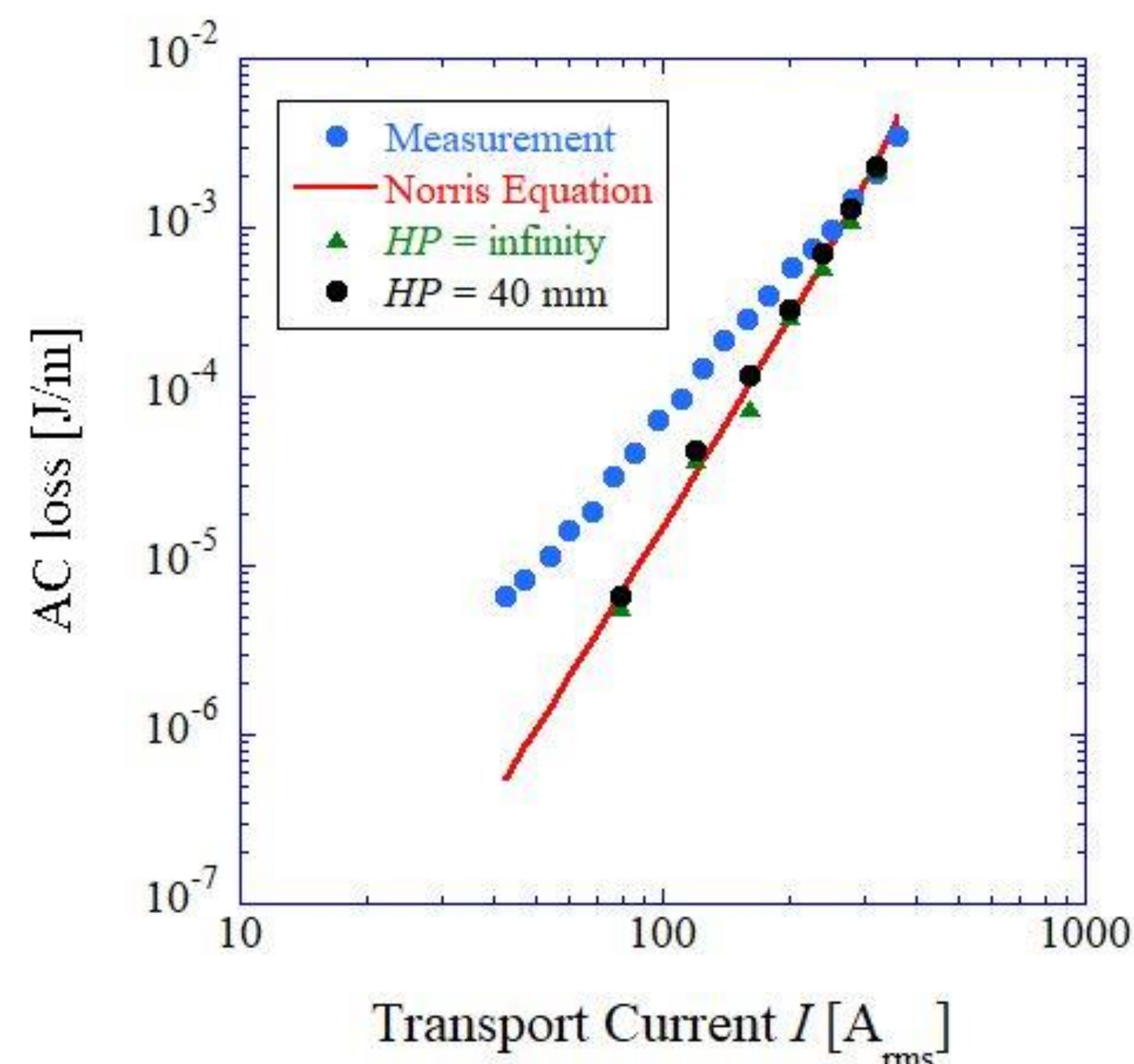


図5. 超電導ケーブルに電流を通電したときの交流損失

まず、ケーブルを構成する超電導テープに巻き付けピッチを加えた場合でも加えない場合でも交流損失の解析結果はほぼ一致することがわかった。また、これらはノリスの式によって得られた計算値と一致した。これは、単層ケーブルであるため生じる磁界が他の層による磁界と相互作用を起こすことがないためであると考えられる。

一方、参考にしたSolovyov等の測定結果と比較すると小さな値が算出され一致しなかった。これは実際のテープには「肩」と呼ばれるテープ端部での臨界電流値の減衰が起きているにも関わらず、本研究で作成したケーブルのモデルにはこの「肩」を考慮できていなかったことが原因だと考えられる。

まとめ

まず電流を通電した時の解析結果から、巻き付けピッチを加えた場合でも加えなかった場合でも交流損失に変化はなくノリスの式による計算値と一致することがわかった。このような結果になったのは単層ケーブルでは他の層により生じる磁界との相互作用が無いためであると考えられる。また、Solovyov等の測定結果と比較するとどちらの解析結果も低い値となり一致しなかった。これは実際のテープには「肩」というテープ端部での臨界電流値の減衰が起きているにも関わらず、これを考慮してモデル作成を行うことができなかったことが原因であると考えられる。次に磁界を印加した時の解析結果から、高い磁場を印加する場合にはメッシュの要素比・分割数を12と粗めに設定した場合の結果と18と細かくした場合の結果がほぼ一致することがわかった。実際に超電導ケーブルが応用される場合には高磁場のかかる状況で応用されることが多いため、解析時間の短縮のためにメッシュは要素比・分割数を12程度の粗めなサイズにしてよいことがわかった。また、Solovyov等の測定結果とCOMSOLによる解析結果を比較すると解析結果は低い交流損失を算出していることがわかる。これもモデルを作成する際に「肩」という現象を考慮できていなかったことが原因であると考えられる。

参考文献

[1]: M Solovyov, J Souc, F Gomory : AC loss properties of single-layer CORC cables, Journal of Physics, 2014