

臨界電流密度の磁界依存性を考慮した 超電導体の通電交流損失の数値解析

右田 稔, 小田部 荘司, 松下 照男
(九工大・情報工)

1. はじめに 交流磁界または交流電流による超電導体の交流損失の計算は、一般にその形状に大きく依存し、円柱状超電導体などのように対称性の高い場合は解析的に求めることが出来る。しかし、任意形状の超電導体の場合の交流損失を解析的に求めるには境界条件を満たす自己無矛盾の磁束分布解を求めなければならず、非常に困難である。また、実際の超電導体の臨界電流密度は磁界依存性を持つため、問題はさらに複雑である。そこで、ここでは有限要素法を用いて超電導体内部の現象をシミュレートし、交流損失を数値解析により求める。

今回は、その第1歩として簡単な円柱状超電導体において、臨界電流密度の磁界依存性を持たない Bean モデル及び、磁界依存性を持つ Kim モデルを仮定し、それぞれ有限要素法を用い通電交流損失を求める。また、得られた数値解と理論値の比較を行い、有限要素法の信頼性を確かめる事を目的とする。

2. シミュレーション 有限要素法により、円柱状の超電導体の通電交流損失を求める。円柱の半径は 11 mm とする。電流は表面から最大で 1 mm の深さまでしか侵入しない値に設定するため、半径 10 mm 以内の領域は定義していない。また長さ (z) 方向には無限の長さを持つとしているが、対称性からその一部の 1 mm のみを考慮する。さらに、方位角 (θ) 方向の対称性から θ に関して $1/360$ のモデルを用いる (図 1)。これらは、有限要素法による計算量を低減するための措置である。また、空気相と接する $r = 11$ mm の面には自然境界面を適用している。このような形状の超電導体の z 方向に交流電流を通電し、超電導体内の磁束分布 (θ 成分) を求める。このとき、通電電流値により $r = 11$ mm における磁束密度の値が決まり、損失密度が求まる。一方、臨界電流密度の磁界依存性として、今回は Bean モデル ($J_c = 1.0 \times 10^9 \text{ A/m}^2$) と Kim モデル ($J_c = 1.5 \times 10^9 / (1 + \hat{B}/0.1) \text{ A/m}^2$) を仮定している。

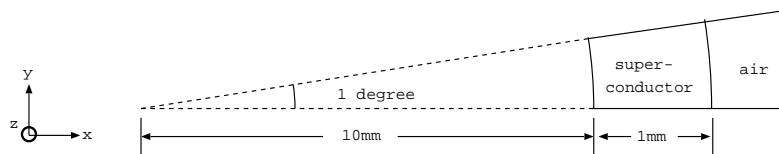


図 1: 解析に用いた有限要素法のモデル。

3. 結果及び検討 図 2 に Bean モデルおよび Kim モデルを仮定した場合のシミュレーション結果を示す。 I_m は交流電流の振幅で、実線は Bean モデルの解析解、黒丸は Bean モデルの有限要素法による数値解を表している。また、破線は Kim モデルによる微分方程式から内部の磁束分布を求め、Poynting ベクトルの一周積分から数値的に得られた結果、白丸は Kim モデルの有限要素法による数値解を表している。図を見て分かるように、両モデルとも良い一致を示している。このことから、有限要素法による計算は比較的精度良く行われていると言える。今後の課題としては、任意形状の超電導体における交流損失を計算し、実際の実験結果と比較し、有限要素法の有用性を検証していく。

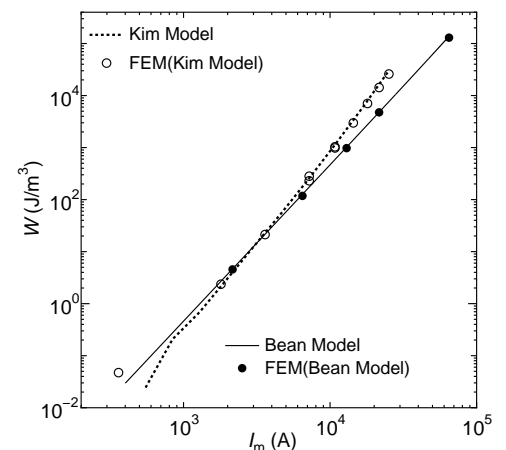


図 2: 理論的な損失密度とシミュレーション結果。