

令和1年度
修士学位論文

有限要素法によるクラックを有する
超伝導接合の臨界電流特性

張 睿哲

学籍番号：18676119

九州工業大学 情報工学府

先端情報工学専攻

小田部研究室

令和2年2月13日

目次

目次.....	2
図目次.....	4
第1章 序論.....	1
1.1 超伝導体.....	1
1.1.1 超伝導体の歴史.....	1
1.1.2 第1種・第2種超伝導体.....	2
1.1.3 銅酸化物超伝導体.....	3
1.1.4 RE系超伝導体.....	3
1.1.5 超伝導体の n 値.....	3
1.2 鉄道への超伝導ケーブルの導入.....	3
1.3 有限要素法.....	4
1.4 JMAG.....	5
1.5 COMSOL Multiphysics®.....	5
1.6 $A-\varphi$ 法.....	5
1.7 臨界状態モデル(Beanモデル).....	7
1.8 本研究の目的.....	8
第2章 FEMによる解析方法と内容.....	9
2.1 解析方法.....	9
2.1.1 超伝導薄膜モデル.....	9
2.1.2 超伝導線材モデル.....	9
2.2 JMAGによる電気特性の妥当性の検証.....	10
2.3 超伝導薄膜の機械特性.....	12
2.4 クラックを有する超伝導薄膜.....	15
2.5 解析内容.....	16
2.5.1 超伝導接合の解析.....	16
2.5.2 クラックを有する長方形接合部の解析.....	18
2.5.3 クラックを有する台形接合部の解析.....	18
2.5.4 はんだ接合の解析.....	19
2.5.5 はんだを用いて臨界電流 I_c 補修の解析.....	19
2.5.6 CC-CC銀拡散接合の解析.....	20
2.5.7 ケーブル接続の解析.....	21
第3章 結果及び考察.....	23
3.1 超伝導接合.....	23
3.1.1 超伝導薄膜の接合.....	23

3.1.2	超伝導線材の接合	24
3.2	クラックを有する長方形接合部	25
3.3	クラックを有する台形接合部	26
3.4	はんだ接合	28
3.4.1	超伝導薄膜のはんだ接合	28
3.4.2	超伝導線材のはんだ接合	30
3.5	はんだを用いて臨界電流 I_c の補修	31
3.6	CC-CC 銀拡散接合	33
3.7	ケーブル接続	34
第4章	結論	35
参考文献	37
謝辞	38
研究業績	39

目次

図 1.1 超伝導状態と常伝導状態の関係.....	1
図 1.2 第 1 種・第 2 種超伝導体.....	2
図 1.3 超伝導ケーブルを導入した場合.....	4
図 1.4 有限要素法の概念図.....	5
図 2.2 YBCO 超伝導線材モデル.....	9
図 2.1 YBCO 超伝導薄膜接合モデル.....	9
図 2.3 電流密度 J_y (上)と磁場 H_y (下)の理論値結果[11].....	10
図 2.4 解析結果と理論結果の比較 (上：電流密度 J_y 下：磁場 H_y).....	11
図 2.5 引っ張る力の応力分布.....	12
図 2.6 応力分布の平面図.....	12
図 2.7 ねじる力の応力分布.....	13
図 2.8 接合部付近の応力分布.....	13
図 2.9 台形接合モデル.....	14
図 2.10 台形接合の応力分布.....	14
図 2.11 台形接合の応力分布の平面図.....	15
図 2.12 電流流れの概念図.....	15
図 2.13 文献[15]にある J_c - B 特性.....	16
図 2.14 超伝導接合のメッシュモデル.....	17
図 2.15 超伝導線材接合のメッシュモデル.....	17
図 2.16 10%、40%と 80%クラックの構造図.....	18
図 2.17 クラックを有する長方形接合部.....	18
図 2.18 クラックを有する台形接合部.....	19
図 2.19 はんだ接合部.....	19
図 2.20 はんだを用いて接合部の補修.....	20
図 2.21 超伝導線材のモデル.....	20
図 2.22 CC – CC 銀拡散接合モデル.....	21
図 2.23 ケーブル接続モデル.....	21
図 2.24 ケーブル接続の部分モデル.....	22
図 3.1 超伝導薄膜接合の電気特性.....	23
図 3.2 超伝導薄膜接合の電流密度分布.....	24
図 3.3 超伝導線材接合の電気特性.....	24
図 3.4 超伝導線材接合の電流密度分布.....	25
図 3.5 クラックを有する長方形接合部の電気特性.....	25
図 3.6 クラックを有する長方形接合部の電流密度分布.....	26

図 3.8 台形接合部の 10% crack の電気特性	27
図 3.7 台形接合部と長方形接合部の比較	27
図 3.9 台形接合部の電流密度分布	28
図 3.10 超伝導薄膜のはんだ接合モデル	28
図 3.11 超伝導薄膜のはんだ接合の電気特性	29
図 3.12 超伝導薄膜のはんだ接合の電流密度分布	29
図 3.13 超伝導線材のはんだ接合モデル	30
図 3.14 超伝導線材はんだ接合の電気特性	30
図 3.15 超伝導線材はんだ接合の電流密度	31
図 3.16 はんだを用いる補修のモデル	32
図 3.17 はんだを用いる補修の電気特性	32
図 3.18 CC – CC 銀拡散接合のモデル	33
図 3.19 CC – CC 銀拡散接合の電気特性	33
図 3.20 ケーブル接続部分モデルの電流密度分布	34
図 3.21 ケーブル接続全体の電流密度分布	34

第1章 序論

1.1 超伝導体

1.1.1 超伝導体の歴史

1911年、オランダのヘイケ・カマーリン・オンネス (Heike Kamerlingh Onnes) が液化ヘリウムを使用し、水銀を冷却した。そして水銀の抵抗が 4.2K で突然ゼロになる現象を発見した。このような通常の導体以上に電流を流しやすい性質を持つ物質は超伝導体と呼ばれ、この現象を起こす温度は臨界温度と定義される。超伝導体は、臨界温度以上の温度で電気抵抗が、通常の電気抵抗がある常伝導体とあまり変わらないが、臨界温度以下になると、超伝導状態に移り、電気抵抗や完全反磁性といった性質を表す。超伝導状態と常伝導状態の関係は、図 1.1 に見られるように、温度の上昇に従い、超伝導体は超伝導状態から常伝導状態へと転移する。同様に、超伝導体に印加する磁界が増加するあるいは流れる電流が大きくなることで、常伝導状態への転移も実現できる。これらの相境界はそれぞれ温度 T_c 、磁界 H_c 、電流密度 J_c に存在する。

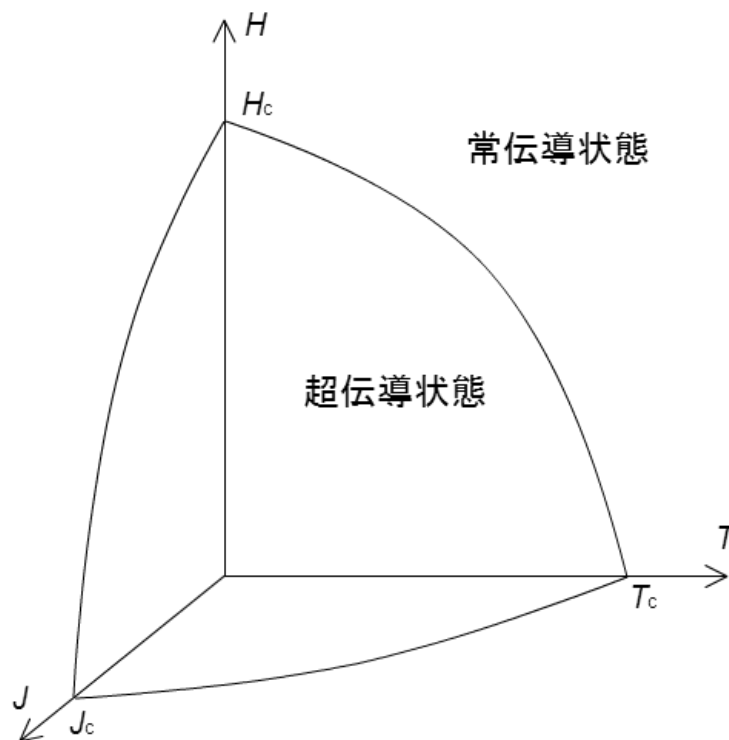


図 1.1 超伝導状態と常伝導状態の関係

1957年にジョン・バーディーン(J. Bardeen)とレオン・クーパー(L. N. Cooper)及びジョン・シュリーファー(J. R. Shrieffer)によって提唱されたBCS理論は、超伝導体の臨界温度 T_c が30Kを超えないと予想された。1986年にドイツのヨハネス・ゲオルグ・ベドノーツ(Johannes Georg Bednorz)とスイスの物理学者のカール・アレクサンダー・ミュラー(Karl Alexander Müller)によって、 T_c が35Kである $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ などのLa-Ba-Cu-O系超伝導体が発見された、これより高温で超伝導状態となる超伝導体の発見が期待された。その後、銅及び酸素を含む超伝導体は銅酸化物超伝導体と呼ばれ、超伝導体に関する研究は急速に発展した。1987年に T_c が液体窒素の沸点(77.3 K)以上の高温超伝導体(HTS: High Temperature Superconductor)も発見され、今後より高い T_c を持つ超伝導体の発見が期待されている。

1.1.2 第1種・第2種超伝導体

超伝導体は1.1.1節に記述したように、完全反磁性という性質を持つものである。完全反磁性とは、外部から印加した磁界は超伝導体内に入り込まないため、超伝導体内の磁界はゼロに保たれるという性質である。1933年にマイスナー(Fritz Walther Meissner)とオクセンフェルト(Robert Ochsenfeld)によって発見されたことから、マイスナー効果と呼ばれる。

臨界磁界以上の外部磁界の印加によって、マイスナー効果が失われ、超伝導体は超伝導状態から常伝導状態へと遷移する。この磁気的な性質より、超伝導体には第1種と第2種の2種類がある。図1.2に示すように、第1種超伝導体では、外部磁界 H_e が臨界磁界 H_c まで、完全反磁性を示し、マイスナー状態にある。一方、第2種超伝導体では、下部臨界磁界 H_{c1} までマイスナー状態を示し、上部臨界磁界 H_{c2} まで磁束の侵入を許し、それ以上の磁界を印加すると常伝導状態になる。

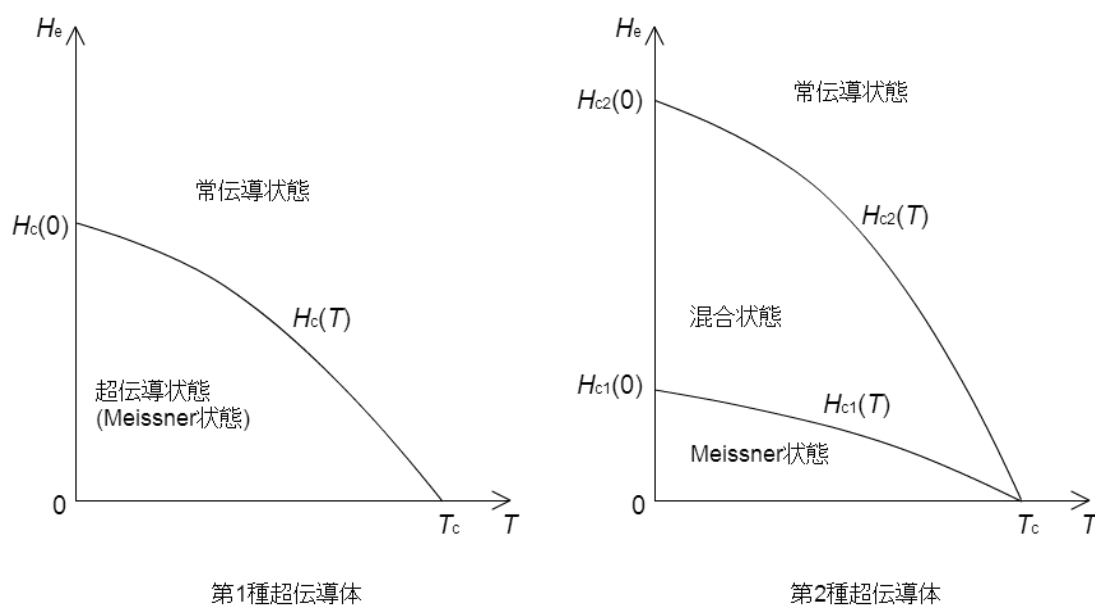


図 1.2 第1種・第2種超伝導体

1.1.3 銅酸化物超伝導体

銅酸化物超伝導体とは、銅原子と酸素原子から構造される二次元銅酸素シートを基本構造として、これを層状に積み重ねた構造を持つ複合銅酸化物超伝導体の総称である。1986年、J. G. ベドノルツと K. A. ミューラー (J. G. Bednorz, K. A. Müller) によってランタン系銅酸化物「 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 」が 30K 以上で超伝導状態を示すことが発見された。そしてその後、Y 系と呼ばれる銅酸化物において、臨界温度は 92K に到達した。1993 年に 135K の水銀系銅酸化物超伝導体「 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 」が発見された。これら銅酸化物超伝導体は線材化される事により送電線、MRI などへの応用が期待される[1]。

1.1.4 RE 系超伝導体

1986 年、銅酸化物超伝導体の発見によって BCS の限界は破られることになり、高い T_c を有する超伝導体は高温超伝導体と呼ばれている。これらのいくつかは、液体窒素の温度を超え、冷媒として液体窒素を用いることが可能である。主なものとして、RE123 系(RE：希土類)、ビスマス系(Bi)、タリウム(Tl)系、水銀(Hg)系がある。代表として、RE123 系の Y123($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$)の臨界温度 T_c は 93K となっている[2]。

一方、Y 系超伝導体(Y123)を始めとする RE123 系超伝導体は、液体窒素の 77K 近傍において、磁界中でも高い臨界電流密度 J_c を有する。その原因で、液体窒素温度で動作する高温超伝導線材として期待される。

1.1.5 超伝導体の n 値

従来の第 2 種超伝導体には、ある臨界電流以下でゼロ抵抗状態、それ以上では抵抗状態という単純な近似を用いることによって、 E - J 特性は以下のように表される。

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1.1)$$

ここで、 E_0 は超伝導体の臨界電流密度 J_c を定義する基準値である。このような超伝導体内の電磁現象を記述するモデルは n 値モデルと呼ばれる。

指数 n を n 値と呼び、第 2 種超伝導体の非線形性を示すパラメーターとして、 J_c とともに用いられている。

1.2 鉄道への超伝導ケーブルの導入

近年の超伝導応用は、エネルギーや環境など多岐にわたる分野において、従来技術では実現しえない革新的機器の実現が可能となる。ここでは、超伝導技術の鉄道への導入に向けた最新の研究開発状況について説明する。

高温超伝導線材には、臨界温度以下で一般の銅線と同じように使用できる。超伝導状態に

なる温度で、電気抵抗がゼロのため、送電線に活用すれば、長距離でも損失がなく送電できる。鉄道への導入に向けた超伝導線材を応用するため、コイル状や螺旋状に巻き線をし、ケーブルとなる。図 1.3 に示すように、超伝導ケーブルを鉄道のき電線へ応用すると、電気抵抗がゼロである性質から、損失なく電気を遠くまで運ぶことができるため、変電所の負荷平準化や電圧効果の低減による変電所数の削減、回生効率の向上が期待できる。また、レールに流れる帰線電流を超伝導ケーブルに流すことで大地への漏れ電流もなくなり電食の問題も解決できる[3]。

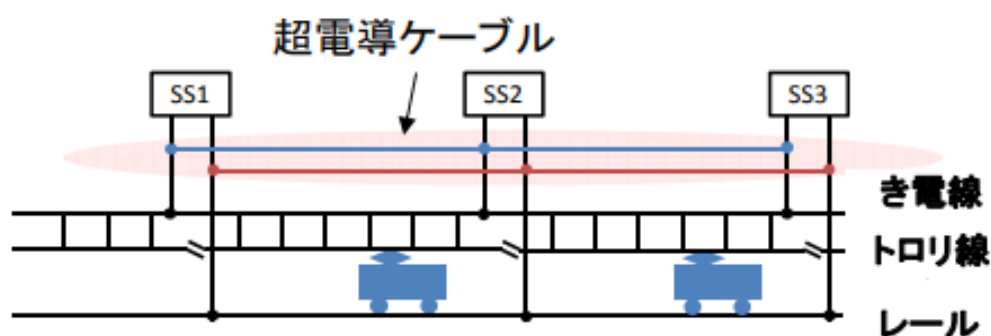


図 1.3 超伝導ケーブルを導入した場合

1.3 有限要素法

有限要素法(FEM: Finite Element Method)は、解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に求める方法の一つである。円柱や平板など単純な形状でもなく、複雑な形状の解析は有限要素法を用いて解くことができる。そこで複雑な形状の問題の解析を行う場合は、対象物を三角形や四角形のような単純な形状要素に分割し、それぞれの要素について境界条件を満たすように方程式を用いて近似表現する。つまり要素ごとに作製された方程式を対象物全体の連立一次方程式として組み立てて計算を行う。また分割された要素をメッシュと呼ばれ、メッシュを細かくすることで計算精度は増加する。しかし、メッシュの数が増えると計算時間も増加する。そのため、解析対象物についてよく理解し、計算精度と計算時間と計算精度の両方を考慮した適切なメッシュサイズ・メッシュの形状の選択が必要となる。有限要素法の概念を図 1.4 に示す。

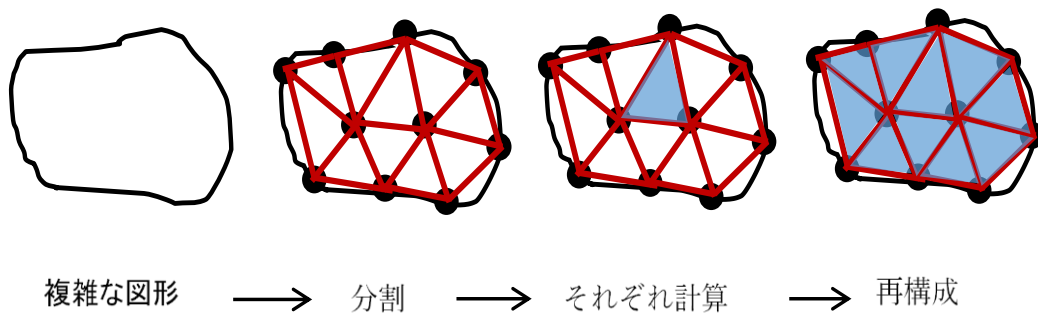


図 1.4 有限要素法 の概念図

1.4 JMAG

JMAG は 1983 年に株式会社 JSOL が開発した電気機器設計、開発のためのシミュレーションソフトウェアであり、有限要素法を用いて高速に解析することによりバルク内部の複雑な物理現象を正確に捉えることができる。また、JMAG は「高い分析能力」、「高速計算」、「高い生産性」、「オープンインターフェース」の 4 つのコンセプトから成り立っている[4]。

1.5 COMSOL Multiphysics[®]

COMSOL Multiphysics[®]は COMSOL 社 が開発した、設計やデバイス等をモデル化するための有限要素法ベースの汎用シミュレーションソフトウェアである。電磁気学や構造力学など多方面の分野において用いることができる。異なる分野での物理現象を相互に計算するマルチフィジックス計算に長けている[5]。

1.6 A - ϕ 法

渦電流問題を高速に解く方法として、磁気ポテンシャル A と電気スカラーポテンシャル ϕ を未知数として解くベクトルポテンシャル法(A - ϕ 法)というものがある。

磁束密度 B は、磁気ポテンシャル A を用いると、

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1.2)$$

と表せる。これを Maxwell 方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} + \dot{\mathbf{B}} = 0 \quad (1.3)$$

に代入すると、

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}} = -\nabla \times \dot{\mathbf{A}} \quad (1.4)$$

すなわち、

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad (1.5)$$

と表せる。ここで \mathbf{E} は電場の強度、 $\dot{\mathbf{B}}$ は $\partial\mathbf{B}/\partial t$ である。任意のスカラー関数 ϕ について、 $\nabla \times \nabla\phi = 0$ であるから、 \mathbf{E} は

$$\mathbf{E} = -\dot{\mathbf{A}} - \nabla\phi \quad (1.6)$$

と表せる。

透磁率 μ 、電気伝導率 σ の導体中の磁場強度を \mathbf{H} 、電流密度を \mathbf{J} とする。

$\nabla \times \mathbf{H}$ に関する Maxwell 方程式は

$$\nabla \times \mathbf{H} = \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{J} = 0 \quad (1.7)$$

であるが、周波数が極めて低い場合を考慮するので電束密度 \mathbf{D} の時間微分は無視できると考えると

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1.8)$$

となる。式(1.8)に、式(1.2)および関係式

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1.9)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad (1.10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.11)$$

を代入すると

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) \quad (1.12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \sigma \mathbf{E} = -\sigma \nabla \cdot (\nabla\phi + \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad (1.13)$$

となる。任意のベクトル \mathbf{A} において

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (1.14)$$

が成立する。これにクーロングージ条件($\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$)を代入する、

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = -\nabla^2 \mathbf{A} \quad (1.15)$$

となる。式(1.12)、式(1.13)に代入すると、

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \sigma (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\phi) \quad (1.16)$$

となる。ここで $\phi = \Phi$ と定義して、式(1.13)、式(1.16)に代入すると、それぞれ

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \sigma (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\Phi) \quad (1.17)$$

$$\nabla \cdot \sigma (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\Phi) = 0 \quad (1.18)$$

となる。これらが導体中の支配方程式である。

次に、空気領域では、 \mathbf{J}_{ex} を外部電流密度とすると、Maxwell 方程式より

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{ex} \quad (1.19)$$

$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A}$ (μ_0 は空気中の透磁率)と Maxwell 方程式から。

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_{ex} \quad (1.20)$$

よって空気中の支配方程式は、

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{J}_{ex} \quad (1.21)$$

となる。

支配方程式を空間で離散化すると誤差が生じる。たとえば、導体中の支配方程式では、

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} - \sigma(\dot{\mathbf{A}} + \nabla \dot{\Phi}) = \delta \mathbf{x} \quad (1.22)$$

となり、 $\delta \mathbf{x}$ が誤差である。有限要素法では、左辺の微分方程式と右辺の誤差に重み $\delta \mathbf{w}$ をかけて体積積分したものをゼロと考えることにより、誤差 $\delta \mathbf{x}$ を考慮しなくてもよいようにしている。

$$\int_V \delta \mathbf{w} \cdot \left\{ \frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} - \sigma(\dot{\mathbf{A}} + \nabla \dot{\Phi}) \right\} dV = \int_V \delta \mathbf{w} \cdot \delta \mathbf{x} dV = 0 \quad (1.23)$$

A- ϕ 法の有限要素法では、重み $\delta \mathbf{w}$ をAの各成分の微小変化

$$\delta \mathbf{w} = (\delta A_x, \delta A_y, \delta A_z) \quad (1.24)$$

とする。

他の支配方程式についても同様の操作を行う。

1.7 臨界状態モデル(Bean モデル)

第2種超伝導体では、混合状態下に磁束線が超伝導体内部に入り込むことから、超伝導電流の影響により磁束線は Lorentz 力を受ける。Lorentz 力 \mathbf{F}_L は超伝導体に流れる電流密度 \mathbf{J} と超伝導体に侵入する磁束密度 \mathbf{B} から表すことができ、 $\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ である。磁束線は Lorentz 力による駆動力を受け動こうとするが、この磁束線の動きを止めるようにこの力に等しい制動力が働く。その一つがピンニング力 \mathbf{F}_P であり、もう一つが粘性力 \mathbf{F}_V である。これらの力が釣り合っているモデルのことを、臨界状態モデルという。臨界状態モデルは、

$$\mathbf{F}_L + \mathbf{F}_P + \mathbf{F}_V = 0 \quad (1.25)$$

で表せる[6]。

ここで、無限円柱を想定した超伝導体について考える。このとき、準静的に外部磁場が変

化するような過程においては、磁束線の速度 v が小さいため、粘性力 F_V は無視できる。そのため、

$$\mathbf{F}_L + \mathbf{F}_P = 0 \quad (1.26)$$

で表せる。対称性より、半径方向の磁束密度 B_r 、動径方向の磁束密度 B_ϕ はそれぞれ 0 となる。ここで、 δ は磁束線の半径方向の移動を示すものとし、1、または-1を示すものとする。また、 B_z は z 方向の磁束密度、 J_c は臨界電流密度、 r はバルク中心からの動径方向の距離、 μ_0 は真空の透磁率とすると、

$$F_L = \frac{B_z}{\mu_0} \frac{dB_z}{dr} \quad (1.27)$$

$$F_P = \delta J_c B_z \quad (1.28)$$

より、

$$-\frac{B_z}{\mu_0} \frac{dB_z}{dr} = \delta J_c B_z \quad (1.29)$$

となる。

1.8 本研究の目的

YBa₂Cu₃O_{7- δ} (YBCO)が発見されて以来、線材化の工夫がなされ、イットリウム系高温超伝導コート線材(Coated Conductor; CC)は実用的なレベルまで開発が進み、第2世代高温超伝導線材と呼ばれている。CCは臨界電流値(I_c)が高く、 I_c の高磁場での劣化が低く、また良好な機械的特性および妥当なコストのため、超高磁場 NMR/MRI などの各種応用機器への適用が期待されている。高温超伝導線材は、直流送電に利用する場合、電気抵抗がゼロという特徴を持つため、実際に利用するとき、超伝導ケーブルが求められている。しかし、現在では超伝導線材は数百メートル単位でしか製作することができないため、そのままでは送電ケーブルとしての運用をすることが難しい。そのためには、超伝導線材間の接合技術が不可欠である[7-10]。現在では超伝導体を用いた送電ケーブルの開発が進み、はんだなどの低抵抗接続を用いない接合方法も考案されているが、現実的な接合方法としてははんだを用いた接続が検討されている。一方で超伝導線材同士の接合部は、通常の超伝導線材とは異なる電流密度分布・磁界分布、また力を受けるときの応力分布などが表れると考えられ、それらの把握は応用機器の設計にあたり必要不可欠である。

本研究では、有限要素法を用いて超伝導線材の接合を数値シミュレーションし、超伝導接合部の電気特性及び電流の流れを調査する。また、接合部付近に外力によって、クラックが発生する場合、クラックによる電気特性と臨界電流 I_c を復活させる補修方法を調査する。

第2章 FEM による解析方法と内容

2.1 解析方法

本解析では、JMAG-Designer 18.0 を用いて電気特性、Comsol Multiphysics® 5.4a を用いて機械特性シミュレーションを行った。

2.1.1 超伝導薄膜モデル

ケーブル接合を解析する前に、超伝導薄膜接合の解析を行った。超伝導薄膜モデルは、二枚の YBCO 超伝導薄膜を重ねて接合しているようなモデルを基本として作成されている。薄膜の厚さは1 μm とする。作成したモデルを図 2.1 に示す。1章の 1.4 節で紹介した JSOL 社製の JMAG-Designer 18.0 を用いて電気特性を解析する。具体的な解析内容は接合モデルに電流を流し、超伝導薄膜接合部の電気特性を計算した。

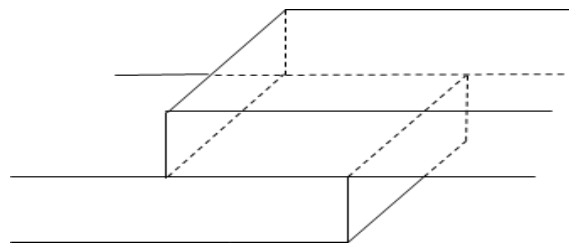


図 2.1 YBCO 超伝導薄膜接合モデル

2.1.2 超伝導線材モデル

超伝導線材モデルでは、厚さ 100 μm の銅板と 1 μm の YBCO 超伝導体で構成されている。作成したモデルを図 2.2 に示す。解析時間を短縮するため、最初は縦 1000 μm × 横 358 μm × 厚さ 101 μm という小さいモデルを作った。接合モデルは薄膜接合と同様に薄膜と薄膜を接合している。また、1.5 節で紹介した COMSOL 社製 Comsol Multiphysics® 5.4a により、接合部の両端に、引っ張る力やねじる力などを加えて、接合部周囲の応力分布を計算した。

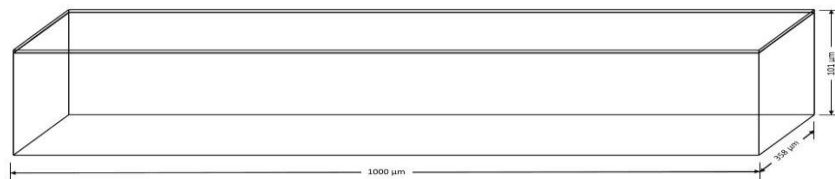


図 2.2 YBCO 超伝導線材モデル

2.2 JMAG による電気特性の妥当性の検証

JMAG-Designer 18.0 による解析結果と超伝導体の電気特性が正しいかどうかを検証するため、Brandt らの論文から理論値結果と比較した[11]。この臨界電流密度の磁界依存性は Bean モデルを用いて計算を行った。臨界電流密度を 3.14×10^{10} A/m² と設定した。

超伝導薄膜がマイスナー状態である限り、磁束は薄膜を貫通しないため、薄膜内部の磁場は $H_e = 0$ である。印加電流 I によって生成される電流密度は

$$J(y) = \begin{cases} \frac{2J_c}{\pi} \arctan\left(\frac{a^2-b^2}{b^2-y^2}\right)^{1/2}, & |y| < b \\ J_c, & b < |y| < a \end{cases} \quad (2.1)$$

となる、薄膜に垂直な磁場成分は

$$H(y) = \begin{cases} 0, & |y| < b \\ \frac{H_c y}{|y|} \operatorname{arctanh}\left[\frac{y^2-b^2}{a^2-b^2}\right]^{1/2}, & b < |y| < a \\ \frac{H_c y}{|y|} \operatorname{arctanh}\left[\frac{a^2-b^2}{y^2-b^2}\right]^{1/2}, & |y| > a \end{cases} \quad (2.2)$$

となる。ここで、 a は薄膜の幅、 $b = a(1 - I^2/I_{\max}^2)^{1/2}$ 、臨界磁場は $H_c = J_c/\pi$ である。理論計算式により、理論値の結果は図 2.3 に示す。

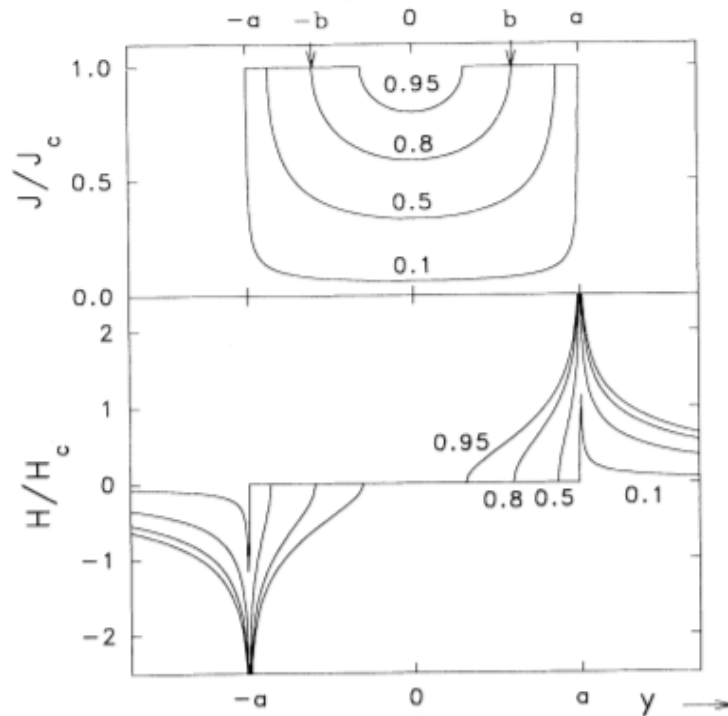


図 2.3 電流密度 $J(y)$ (上)と磁場 $H(y)$ (下)の理論値結果[11]

図 2.3 に示す $J/J_c = 0.1$ の場合、JMAG による数値シミュレーションの結果と理論値の比較を図 2.4 に示す。両者の結果は概ね一致していることで、JMAG の妥当性を証明した。

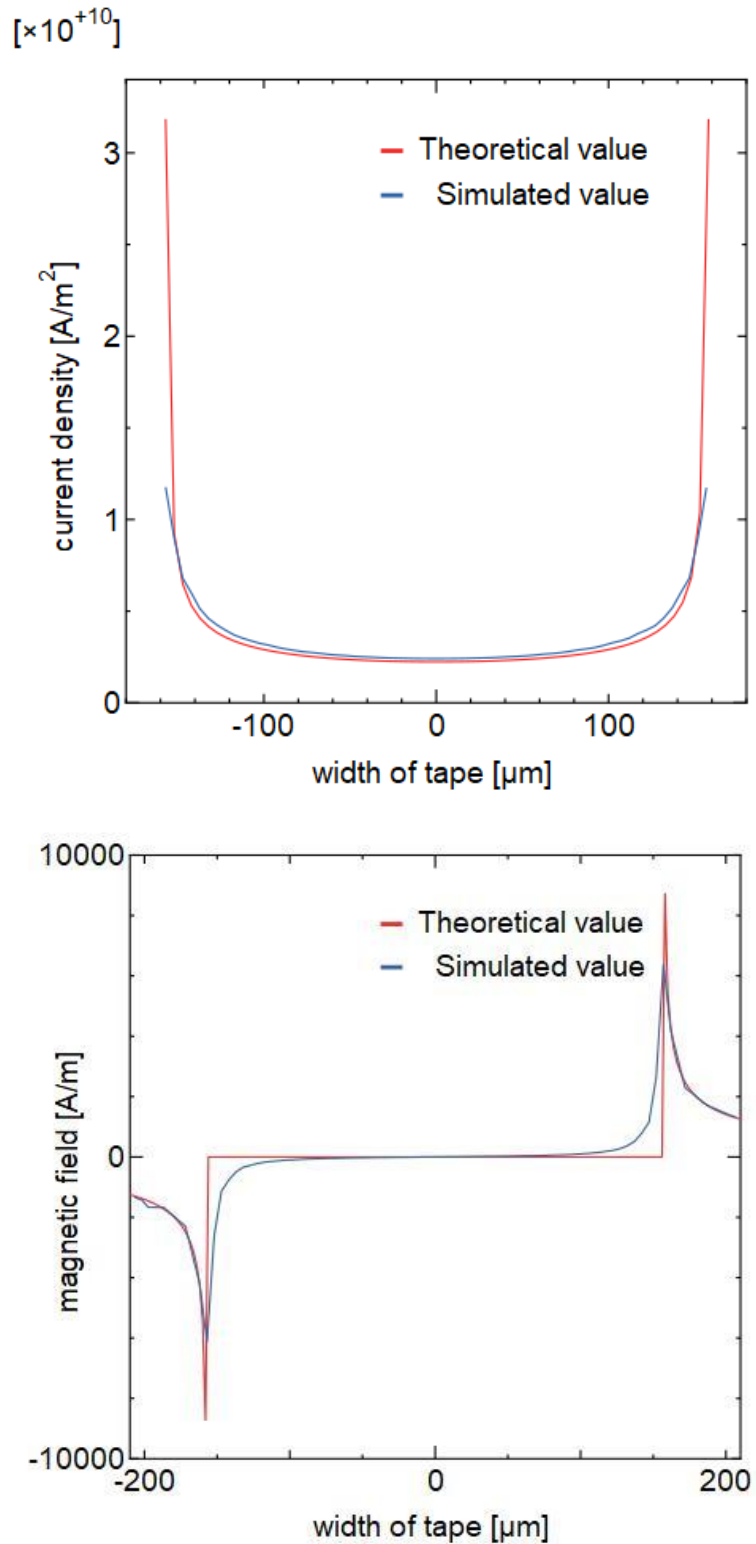


図 2.4 解析結果と理論結果の比較 (上：電流密度 $J(\mathbf{y})$ 下：磁場 $H(\mathbf{y})$)

2.3 超伝導薄膜の機械特性

超伝導薄膜の接合部の機械特性は、COMSOL 社製 Comsol Multiphysics® 5.4a を用いて解析を行った。解析内容は接合部の両端に力をかけて、接合部付近の応力分布を明らかにする。

接合している線材の両端に引っ張る力を加えた時の応力分布結果を図 2.5 に示す。図の色によって応力のかかり具合を示している。青いエリアは接合部で、固定されているため、応力がゼロと表示している。接合部を拡大し、その平面図を図 2.6 に示す。応力が接合部の端に集中していることが分かった。

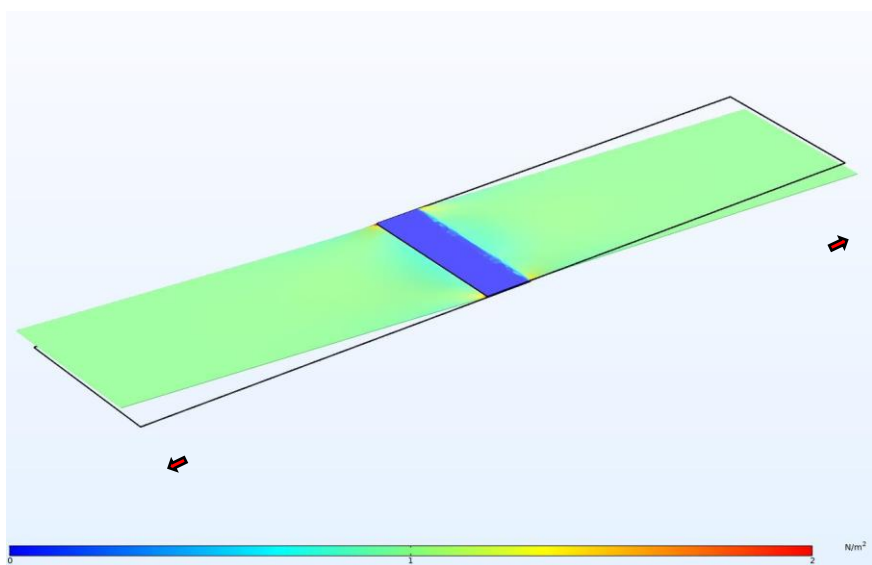


図 2.5 引っ張る力の応力分布

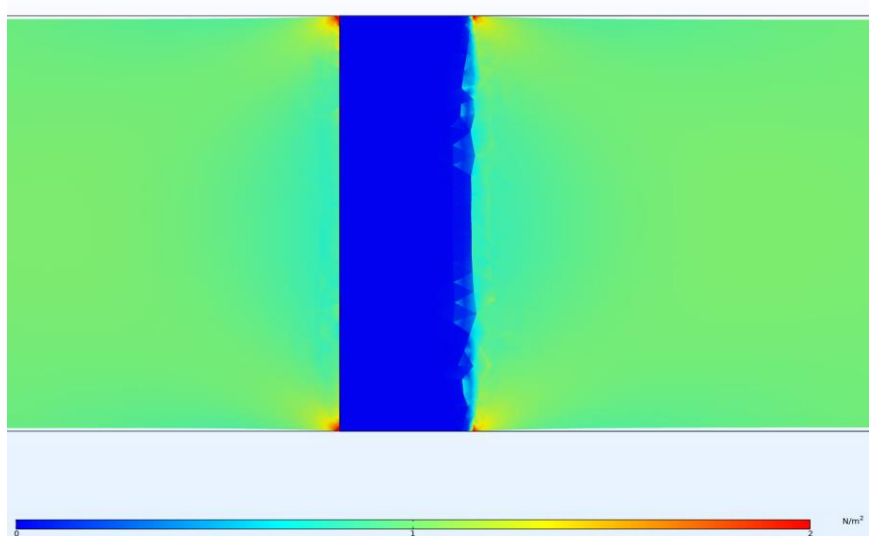


図 2.6 応力分布の平面図

図 2.7 に示すのは、ねじる力がかかった時の応力分布となる。接合部が固定され、両端にはねじる力がかかる原因で螺旋状な変位が発生している。ここでかかった応力の最大値は 4.4 kN/m^2 であった。接合部付近をより見やすくするために、同様に拡大する平面図を図 2.8 に示す。図 2.6 と比較すると、ねじる力がかかったとき、応力が集中している面積が大きくなる。つまり、この部分はより壊れやすいため、クラックが発生する可能性が高める。

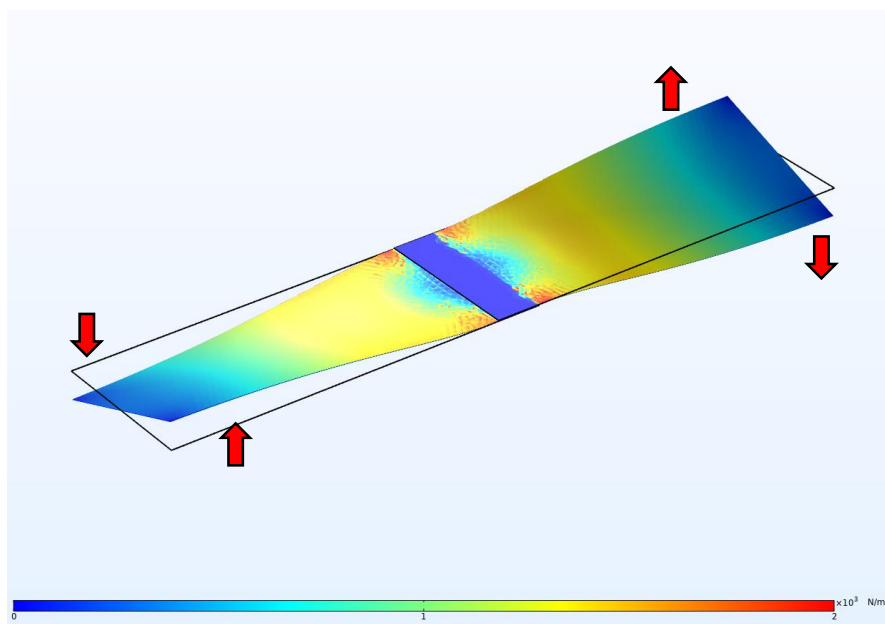


図 2.7 ねじる力の応力分布

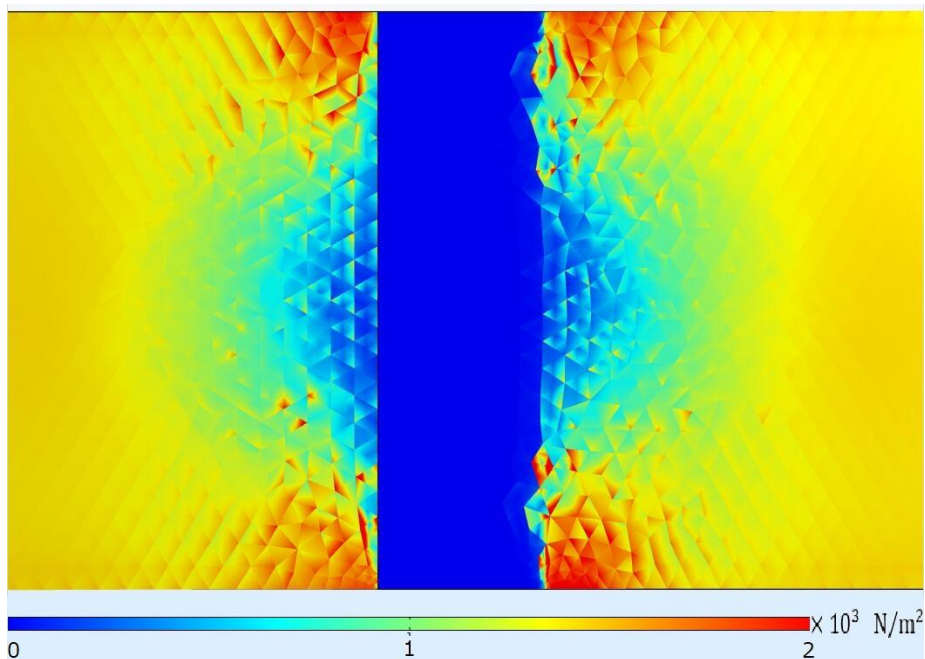


図 2.8 接合部付近の応力分布

赤いエリアの面積を減少するため、住友電工では台形接合という方法を提案している[12]。そこで、住友電工会社ホームページで紹介されている台形接合という接合方法を試してみる。なお、この計算は機械特性の解析であるため、接合部の電気抵抗を考えず、接続箇所におけるしなやかさ（可撓性）を増すために、短い方のモデルを作った。台形接合のモデルを図 2.9 に示す。

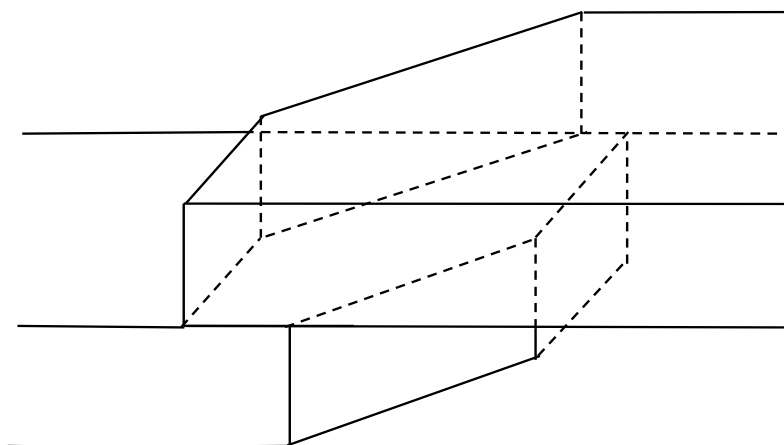


図 2.9 台形接合モデル

前述した長方形接合部と同じように、ここで壊れやすいねじる力を加えた。台形接合による応力分布の結果を図 2.10 に示している。台形接合と長方形接合の接触面積が等しいため、図の色によって応力が集中している赤いエリアの面積が確か減少した。拡大した平面図を図 2.11 に示す。台形接合という接合方法はクラックの発生を抑制することが分かった。

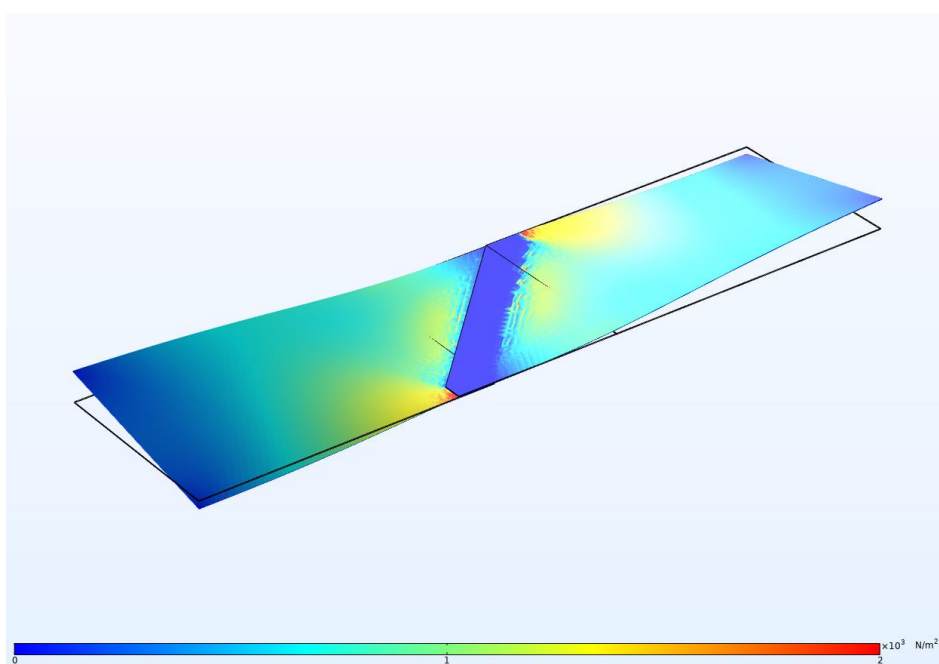


図 2.10 台形接合の応力分布

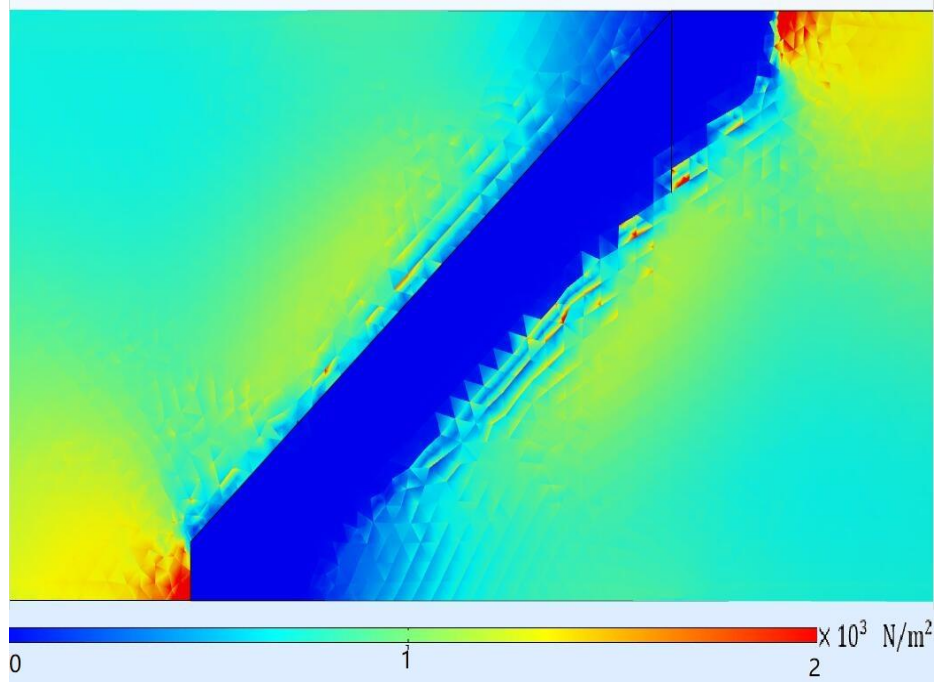


図 2.11 台形接合の応力分布の平面図

2.4 クラックを有する超伝導薄膜

クラックが発生する場合、変形した形状によって、電流流れや薄膜の臨界電流への影響を与える[13, 14]。クラックが発生した後の電流流れの概念図を図 2.12 に示す。図の中には、 a がクラックの長さ并表示している。平板に流した電流は、貫通できないクラックによってブロックされ、クラック上の開口だけに通過する。クラックから離れると、電流が均一になる。

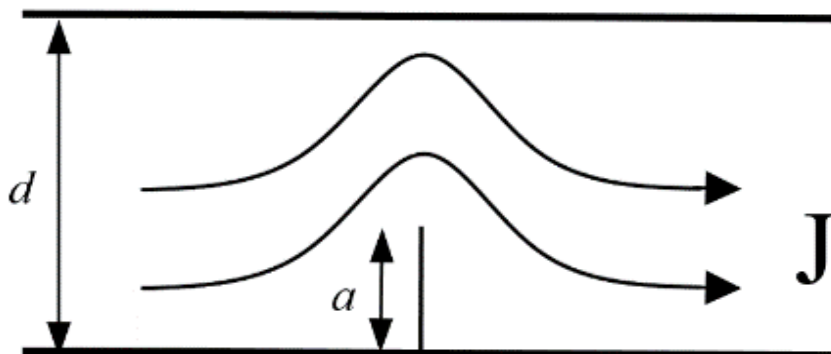


図 2.12 電流流れの概念図

2.5 解析内容

2.5.1 超伝導接合の解析

超伝導接合は図 2.1 に示したように、二枚の超伝導薄膜が接合している。この方法で、超伝導から超伝導への電流の流れが行われるため、スムーズな電流の移動が予想される。本解析は電気特性を計算するため、作成したすべてのモデルについて、モデルの左側から右側に電流を流す。流した電流は直流電流で、0 A からステップごとに増やすとなる。超伝導体について、初期電気伝導率を 1.00×10^{13} S/m、最大電気伝導率を 1.00×10^{15} S/m と設定して計算した。また、 n 値モデルを採用する場合、JMAG による FEM 計算を行う際には、 J_c - B 特性のデータを用いる必要があるため、図 2.13 で示す 77 K の結果を用いる[15]。

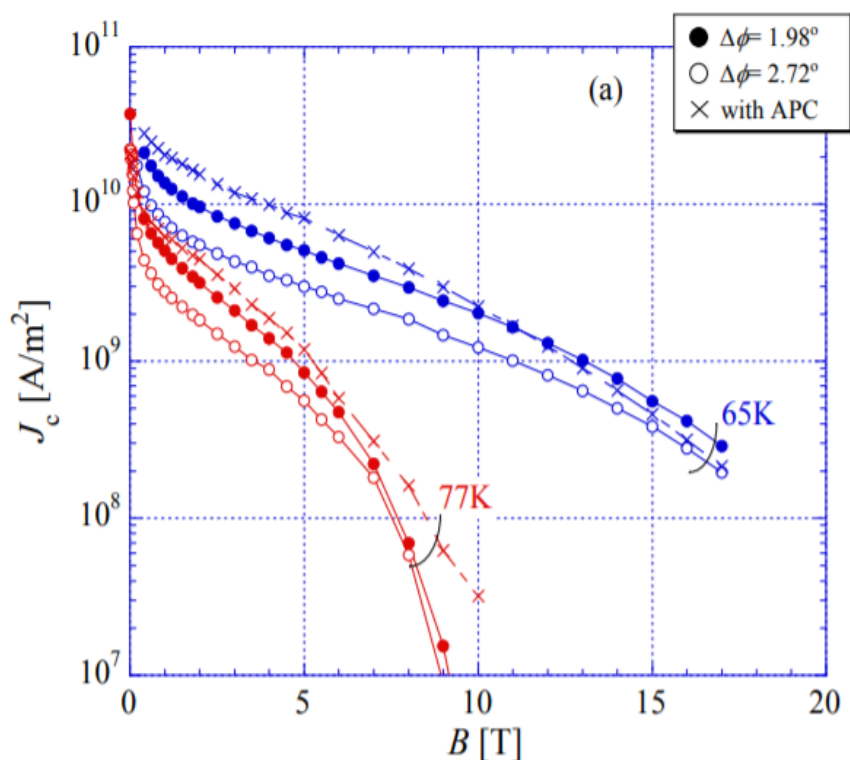


図 2.13 文献[15]にある J_c - B 特性

モデルを作成した後に、解析モデルをさらに細かい要素に分割し、メッシュモデルとなる。薄膜接合のメッシュモデルを図 2.14 に示す。要素をより細かく設定することで、計算の正確性を向上させることができる。

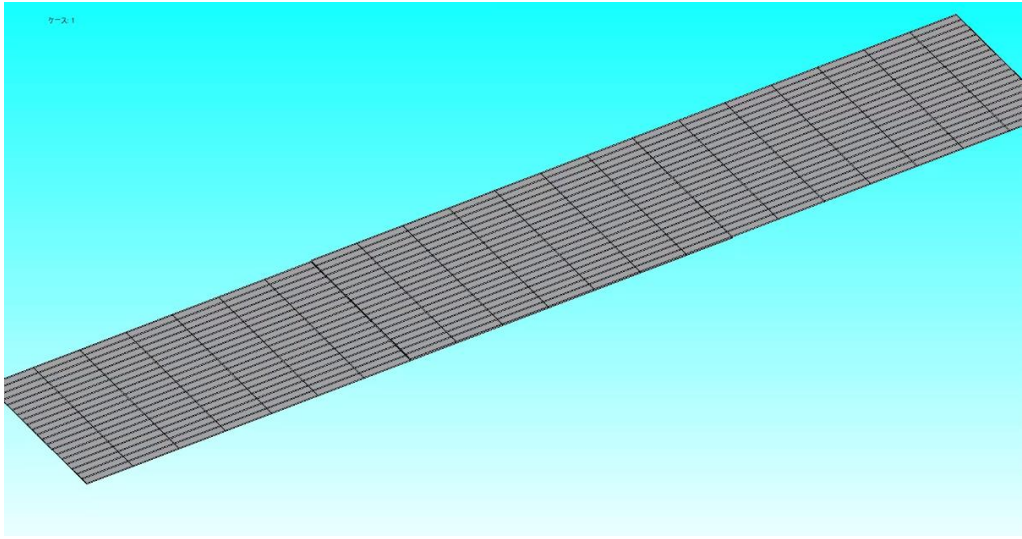


図 2.14 超伝導接合のメッシュモデル

YBCO 超伝導線材接合のメッシュモデルを図 2.15 に示す。灰色の平板は超伝導層、二枚の線材の超伝導層を通じて接合している。オレンジ色の部分は基板としての銅層である。変化の大きい超伝導層部分及びその周辺が重要であるため、銅層の外側により細かくする必要がある。

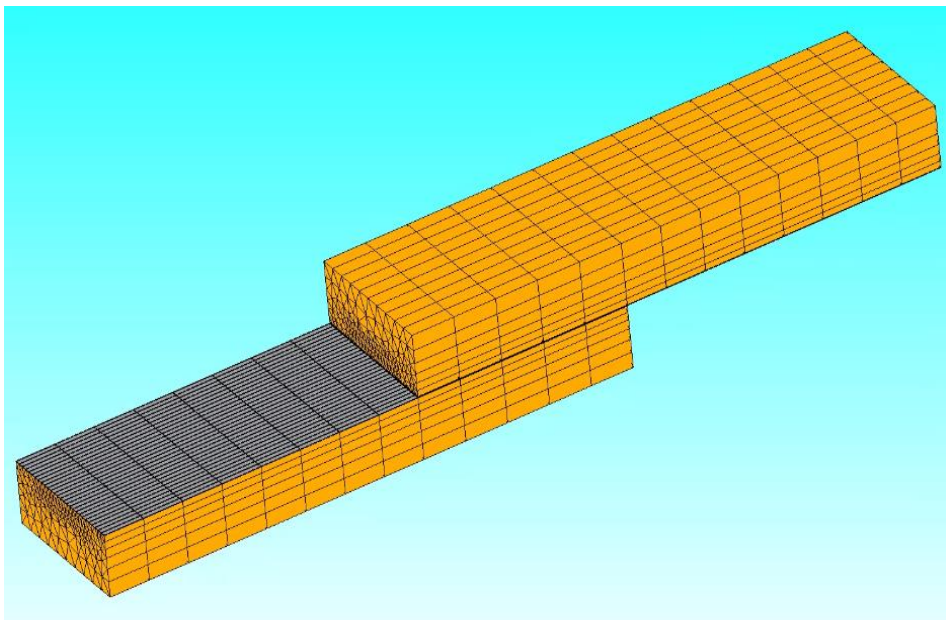


図 2.15 超伝導線材接合のメッシュモデル

2.5.2 クラックを有する長方形接合部の解析

2.4で紹介したクラックを有する薄膜は、接合部の機械特性分析より、容易に発生すると考えている。ここで、クラック長と薄膜の幅の比率を $x\%$ (例として、10%、40%と 80%) とし、図 2.16 に示す。解析に使用したモデルの概念図を図 2.17 に示す。

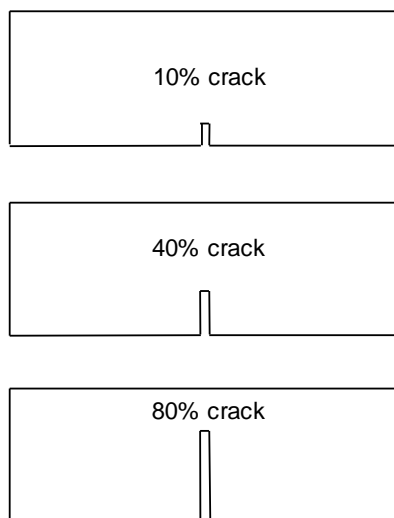


図 2.16 10%、40%と 80%クラックの構造図

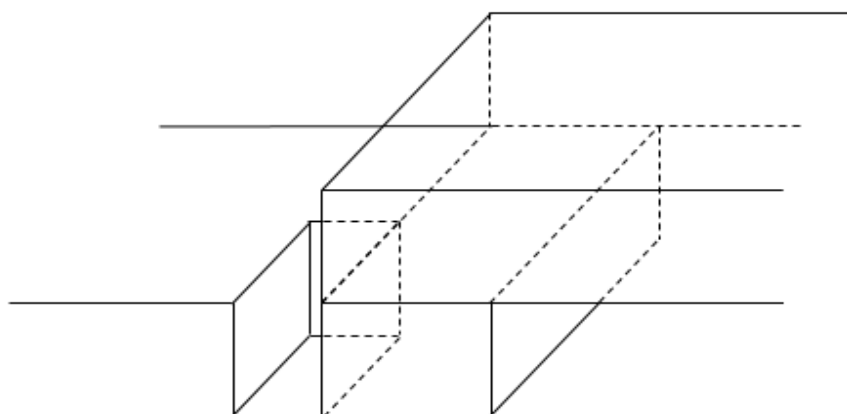


図 2.17 クラックを有する長方形接合部

2.5.3 クラックを有する台形接合部の解析

前述したように台形接合部の応力分布結果より、応力が集中している面積が小さいため、発生したクラックの長さも小さいと考えている。本研究では、10%クラックで解析を行った。使用したモデルを図 2.18 に示す。

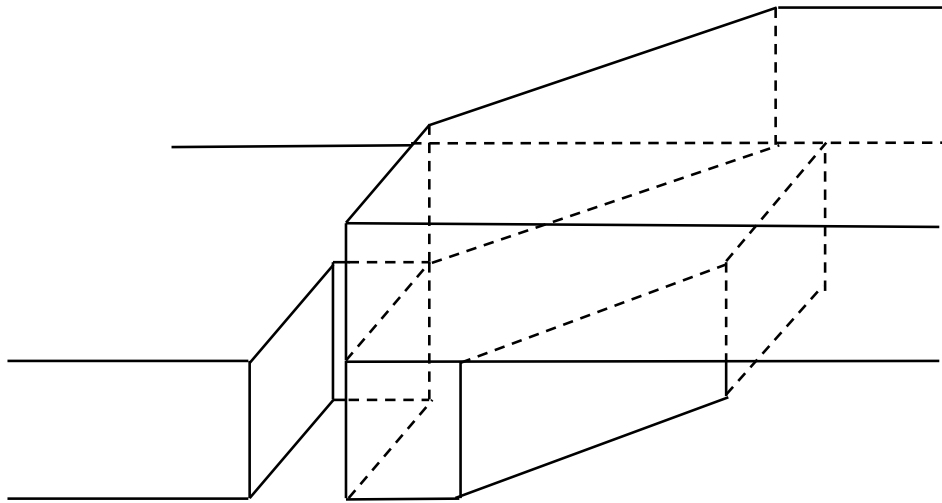


図 2.18 クラックを有する台形接合部

2.5.4 はんだ接合の解析

鉄道に利用する超伝導ケーブルの接合は現場作業であるため夜間の限られた時間で作業を行う。したがって、長時間かかる超伝導接合という接合方法が利用できない[16]。実際に利用される接合方法としては、はんだ等の電気抵抗がある接合材料を用いた接合がある。二つの超伝導薄膜の間にはんだ層を通じて接合する。その概念図を図 2.19 に示す。厚さ $1\ \mu\text{m}$ の超伝導薄膜の間に厚さ $50\ \mu\text{m}$ の均一なはんだ層を挟み込む。解析に用いたはんだの電気抵抗率は $1.4 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot \text{m}$ である。

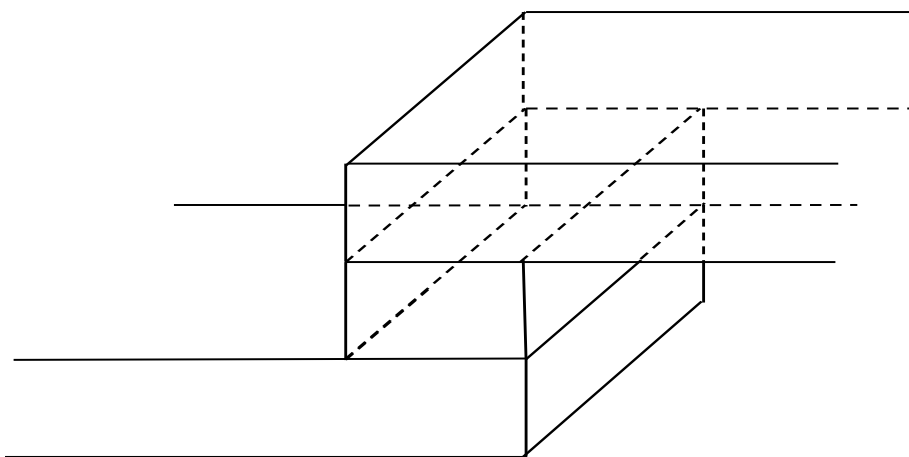


図 2.19 はんだ接合部

2.5.5 はんだを用いて臨界電流 I_c 補修の解析

クラックが発生する原因で、超伝導接合にある程度の影響を与えた。ここで、クラックを修復するため、はんだ接合を用いる補修の方法を考えた。はんだ補修の概念図を図 2.20 に

示す。図 2.20 に示すように、赤い線で囲まれた部分のはんだ層として、はんだの上にもう一層の超伝導薄膜をかけて、接合部の補修を行う。

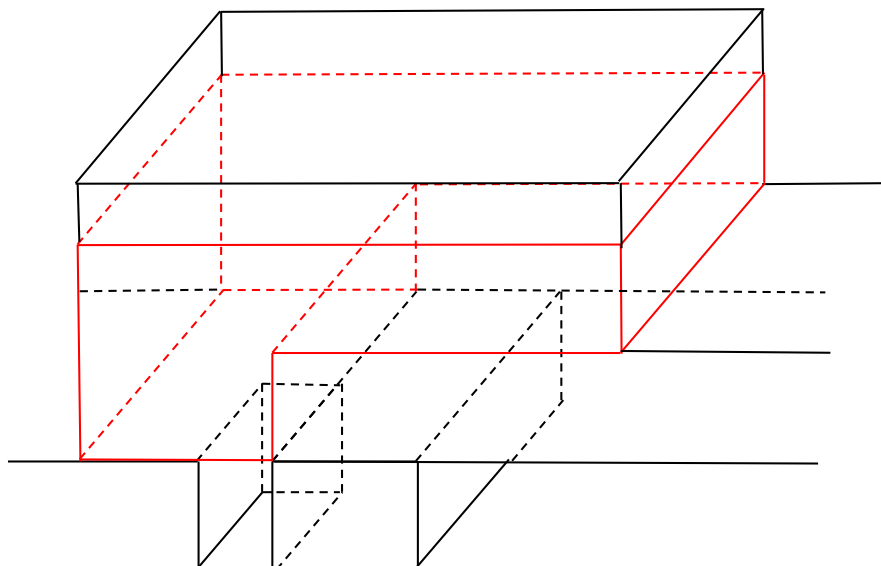


図 2.20 はんだを用いて接合部の補修

2.5.6 CC – CC 銀拡散接合の解析

はんだ接合の電気抵抗が大きいため、遠距離送電する場合のエネルギー損失が増加すると考えた。ここで、低抵抗接合の一つとして、CC – CC 銀拡散接合という補修方法を考えた。

図 2.21 に示すように、銀拡散を使用した超伝導線材は主に基板（銅層）、銀層、超伝導薄膜で構成されている。CC – CC 銀拡散接合とは、線材の銀層を溶けてお互い接合し、低抵抗接合を実現する。

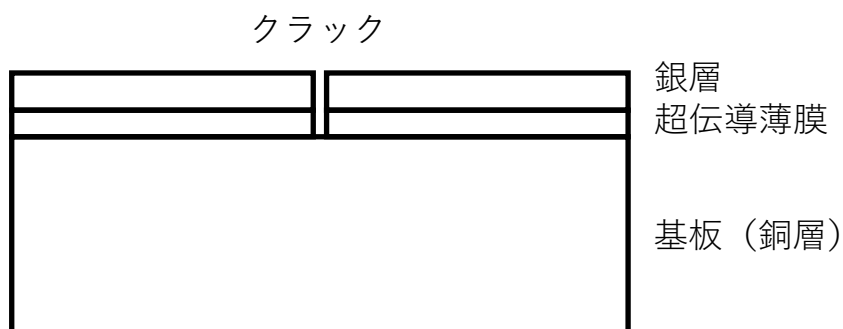


図 2.21 超伝導線材のモデル

接合している超伝導線材のモデルの概念図を図 2.22 に示す。上下は二枚の超伝導線材が銀層を通じて接合し、真ん中にクラックが入っている。一枚の銀層の厚さは $5 \mu\text{m}$ 、電気抵抗率は $1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ である。

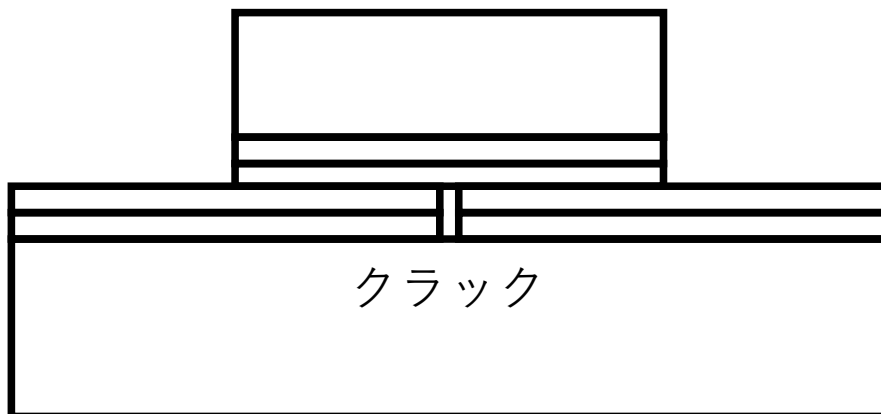


図 2.22 CC – CC 銀拡散接合モデル

2.5.7 ケーブル接続の解析

線材接合の後に、多数の線材を用いて、リング状ケーブル接続の解析も行った。ケーブル接続の概念図を図 2.23 に示す。扇型の部分が銅層、青色の部分がはんだ層、板状の部分が超伝導薄膜となっている。超伝導ケーブルの接合部を銅層で囲い、銅層と薄膜の間隙間をはんだで埋めて接合している。

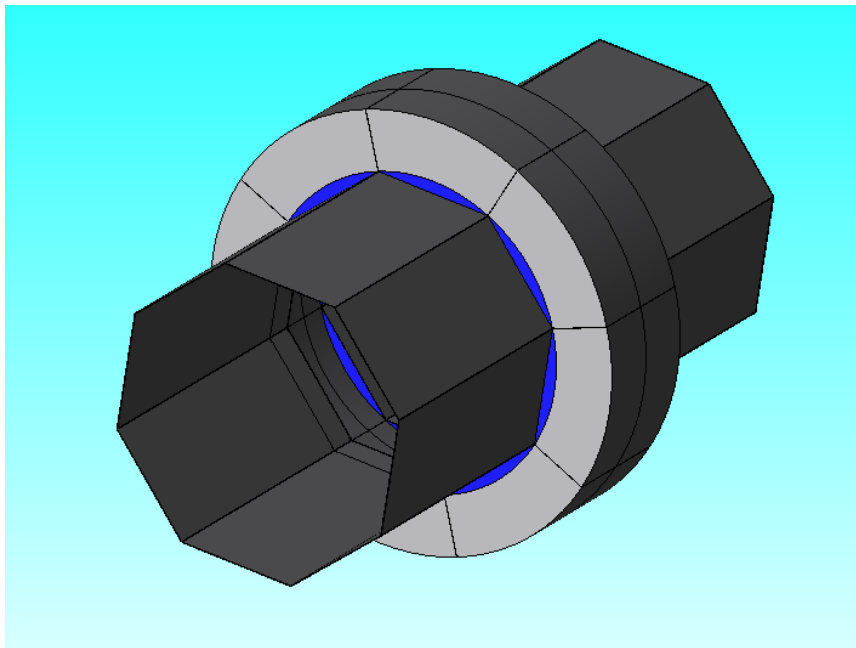


図 2.23 ケーブル接続モデル

また、今回の研究では計算を簡略化するため、図 2.23 に示すモデルを 16 等分したものを計算し、対称面を設定する上それを 16 つ繋げることでケーブル接続を表現した。16 等分したものの一つを図 2.24 に示す。

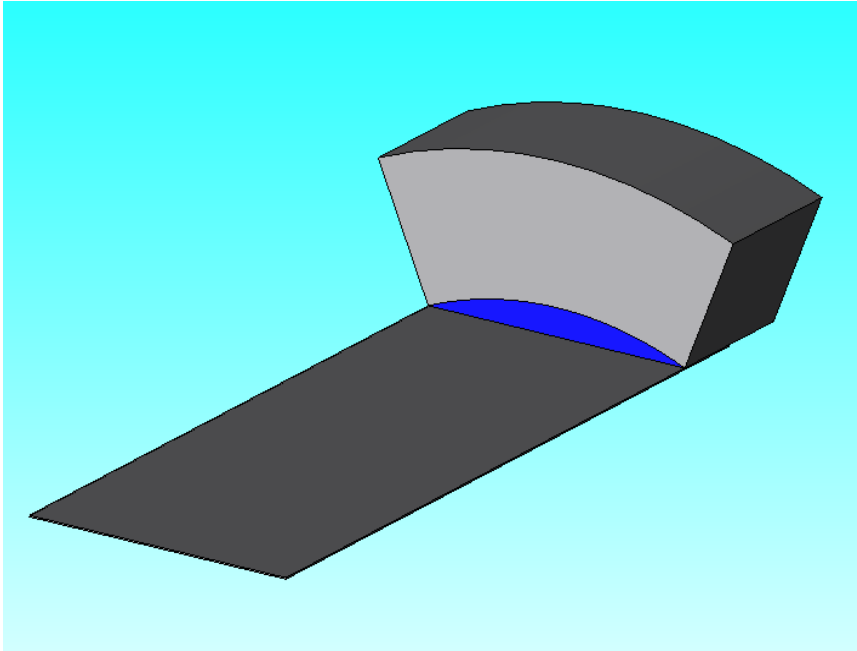


図 2.24 ケーブル接続の部分モデル

第3章 結果及び考察

3.1 超伝導接合

3.1.1 超伝導薄膜の接合

超伝導薄膜の接合モデルは2.1.1節で説明した。ここで、超伝導薄膜接合の電気特性の結果を図3.1に示す。超伝導薄膜には、臨界電流密度を 2.80×10^{10} A/m²設定し、薄膜の幅を4 mmとする。YBCO超伝導薄膜は第2種超伝導体であるため、この n 値は30と設定している。また、2.2でJMAGの電気解析の妥当性を証明した上、図3.1に示すように、超伝導接合部に流した臨界電流は112 Aと示す。この結果より超伝導接合の場合、電気抵抗がゼロである。また、この結果は後の解析のno crackの結果とする。

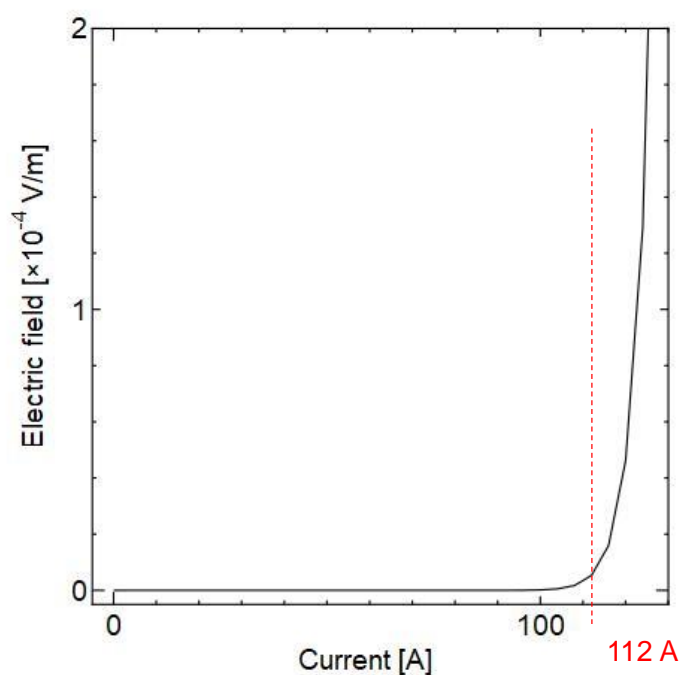


図 3.1 超伝導薄膜接合の電気特性

超伝導薄膜接合の電流密度分布を図3.2に示す。この図は接合部の平面図となっている。矢印の方向は電流流れの方向で、色は電流密度の大きさを示している。図の左側の超伝導薄膜内の電流密度はほぼ均一である。真ん中の接合部内の電流密度は接触面積の原因で、少し下げている。

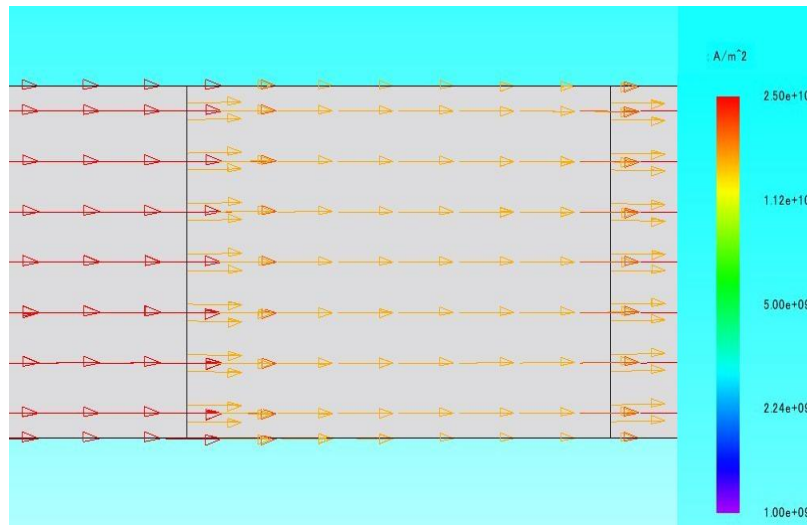


図 3.2 超伝導薄膜接合の電流密度分布

3.1.2 超伝導線材の接合

解析に使用した超伝導線材のモデルは 2.1.2 で説明した。超伝導線材接合の電気特性を図 3.3 に示す。超伝導薄膜接合の結果と比較すると、0–100 A の範囲内で直線の傾きが銅層の電気抵抗と表示している。超伝導線材接合の電流密度分布結果を図 3.4 に示す。この図は接合部の正面図となっている。赤い矢印が真ん中の超伝導薄膜に集中している（色の範囲は $1.00E + 6 - 2.50E + 10$ A/mである）。

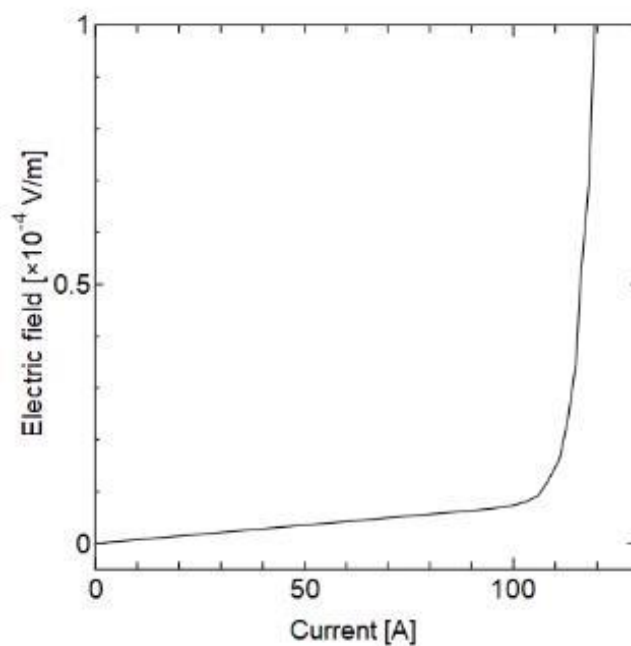


図 3.3 超伝導線材接合の電気特性

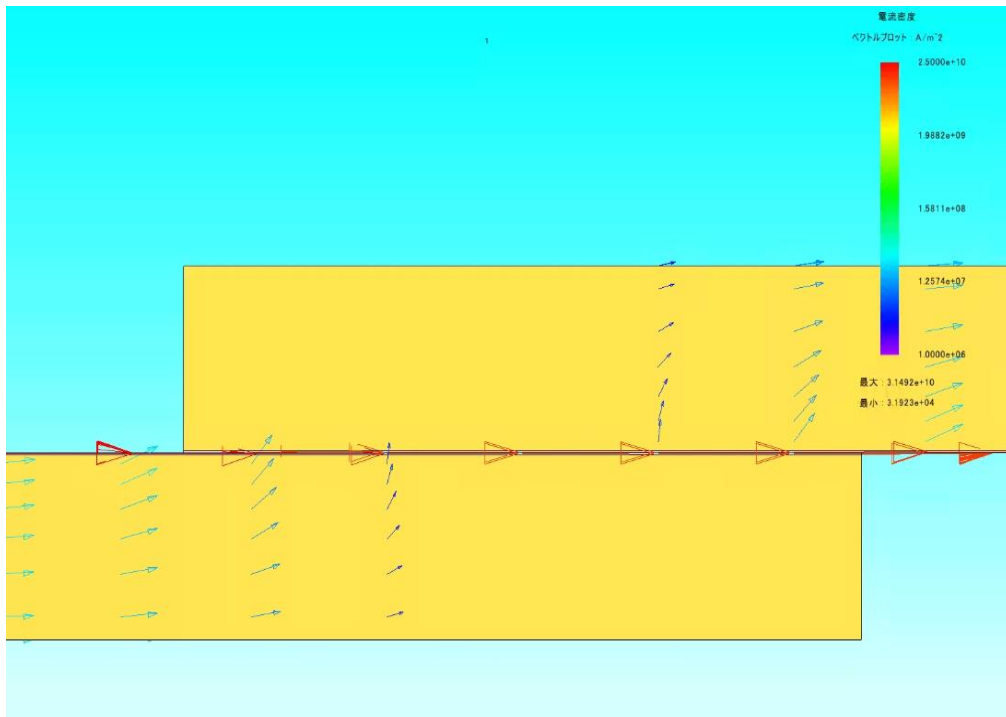


図 3.4 超伝導線材接合の電流密度分布

3.2 クラックを有する長方形接合部

クラックを有する長方形接合部の電気特性の結果を図 3.5 に示す。例としての 10% crack、40% crack と 80% crack の結果を示している。黒い線は 3.1 節の結果である。図 3.5 に示すよ

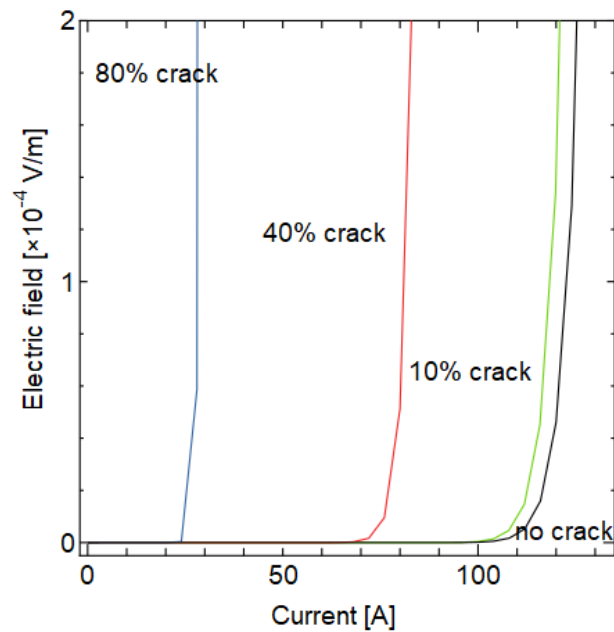


図 3.5 クラックを有する長方形接合部の電気特性

うに、クラック長によって臨界電流が大幅に減少している。例えば、80% crack の場合、流れる電流は大体臨界電流の 20% である。したがって、単純にクラック長だけで臨界電流が決定されている。

クラックを有する長方形接合部の電流密度分布の結果を図 3.6 に示す。この図は、40% crack の結果を示している。図 3.2 と比較すると、電流が上の部分に流れて、クラックを回避した。これは 2.4 で説明した通り、クラックの原因で、超伝導薄膜内の電流がクラックの上に集中している。

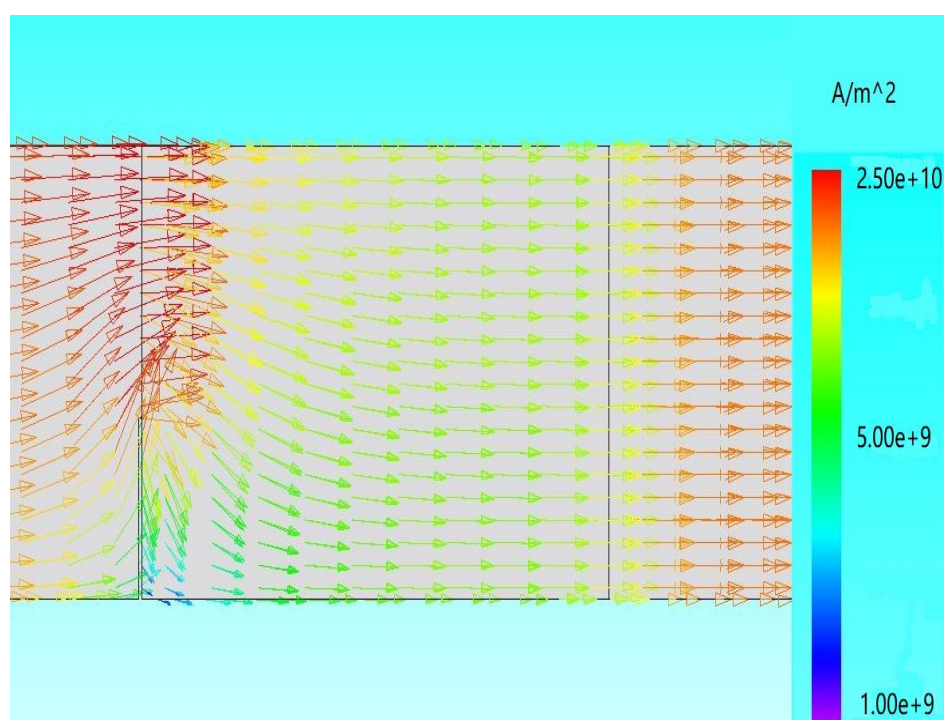


図 3.6 クラックを有する長方形接合部の電流密度分布

3.3 クラックを有する台形接合部

台形接合部の解析に関しては、まず no crack 時の比較を行う。比較の結果は図 3.7 に示す。黒い線は長方形接合部の結果で、赤い線は台形接合部の結果である。両方の結果が概ね一致しており、接合部の形状により臨界電流への影響が小さいということが分かった。

台形接合では、2.3 節の機械特性分析より、小さいクラックが発生すると考えており、10% crack の条件だけで、解析を行った。10% crack の結果を図 3.8 に示す。黒い線は台形接合部の no crack の解析結果で、赤い線は 10% crack の結果である。長方形接合部の時のように、臨界電流はクラックより減少している。図から見ると、臨界電流の 90% が流れている。

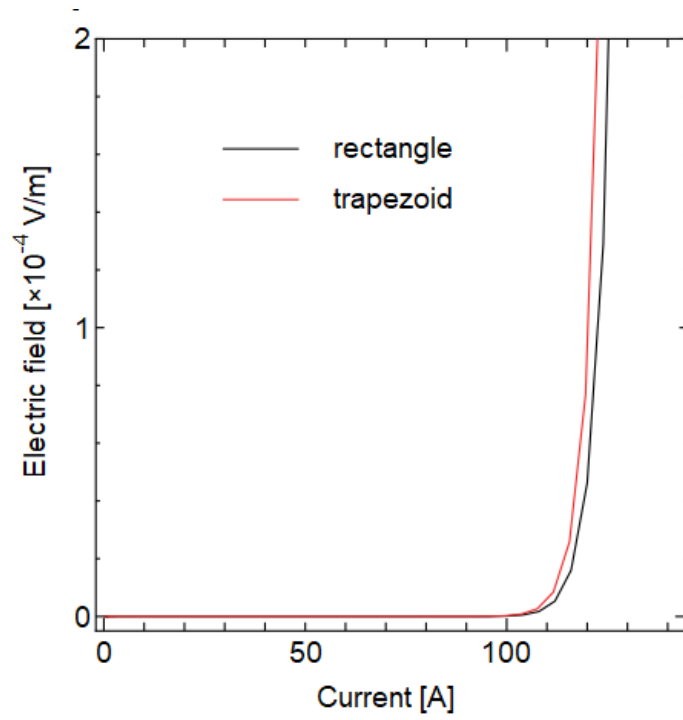


図 3.7 台形接合部と長方形接合部の比較

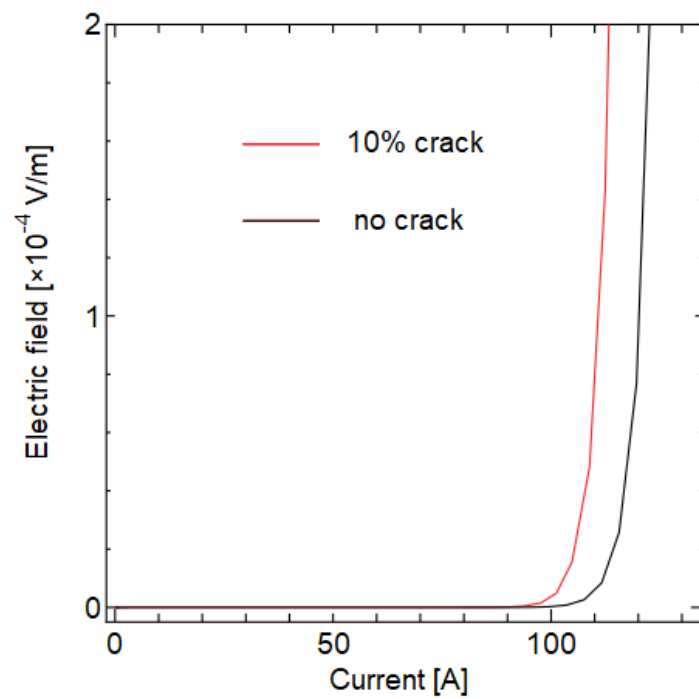


図 3.8 台形接合部の 10% crack の電気特性

台形接合部の電流密度分布の結果を図 3.9 に示す。電流も同じように、クラック上の部分に集中している。台形接合部内の電流がわずかに曲がっているが、全体的に影響がないと考えている。

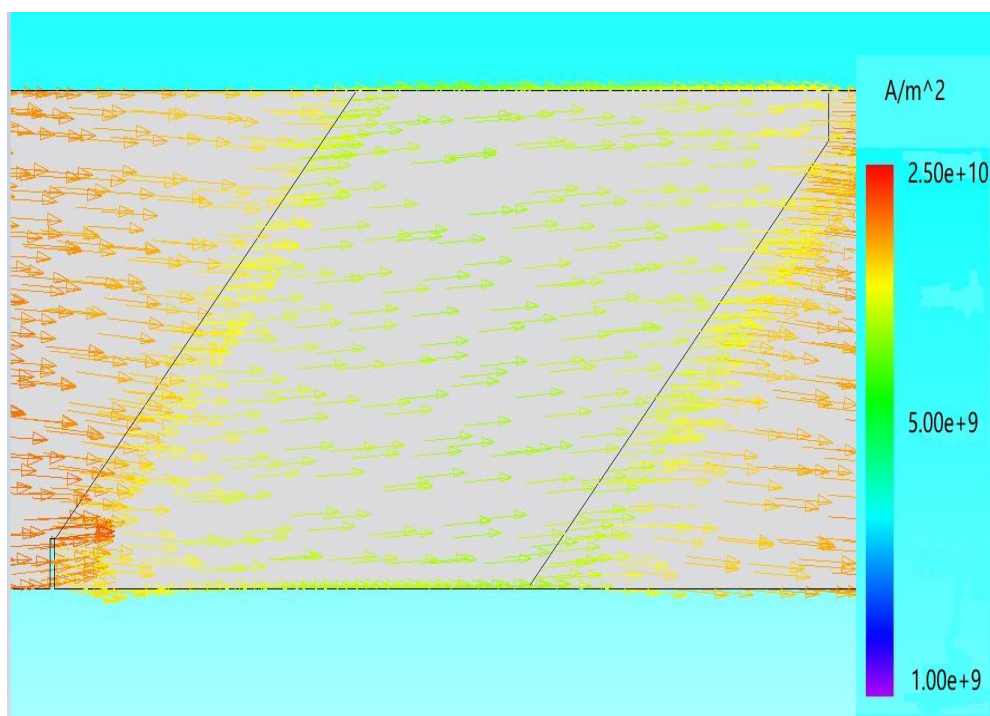


図 3.9 台形接合部の電流密度分布

3.4 はんだ接合

3.4.1 超伝導薄膜のはんだ接合

超伝導薄膜はんだ接合のモデルを図 3.10 に示す。灰色の平板は超伝導薄膜、紫色の部分

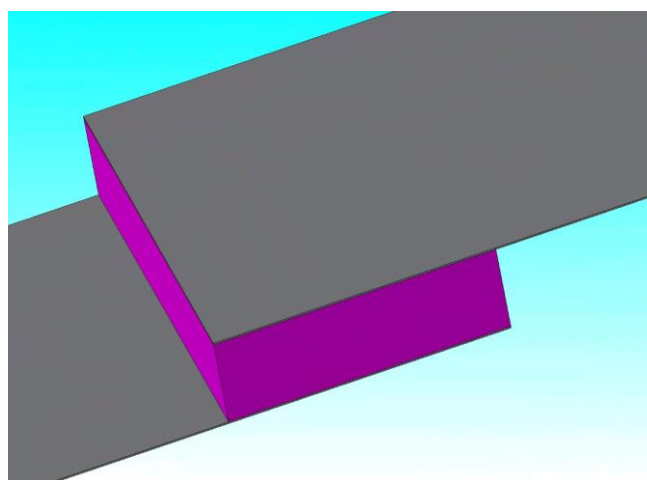


図 3.10 超伝導薄膜のはんだ接合モデル

ははんだである。はんだの厚さを $50\ \mu\text{m}$ 、電気抵抗率を $1.4 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot \text{m}$ とする。はんだ接合の電気特性を図 3.11 に示す。直線部分の傾きから見ると、はんだの電気抵抗が大きいということが明らかに表示している。

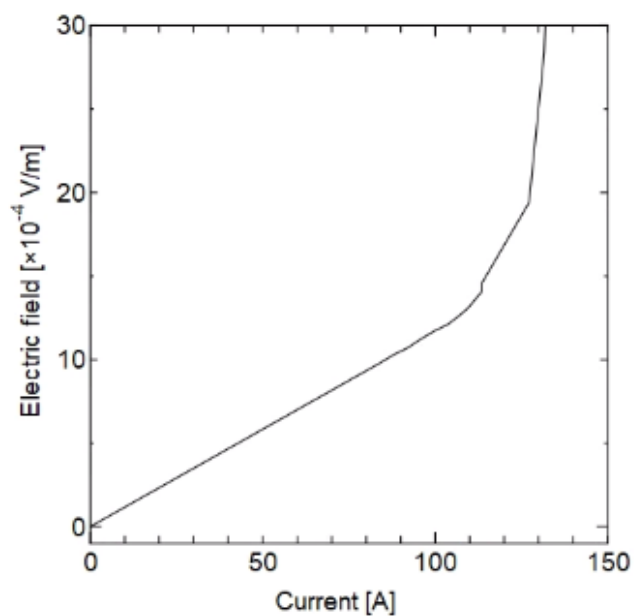


図 3.11 超伝導薄膜のはんだ接合の電気特性

電流密度分布の結果を図 3.12 に示す。はんだ部分での上向きの電流密度の流れが見られる。はんだを伝って電流が下の線材から上の線材へ流れていることがわかる。

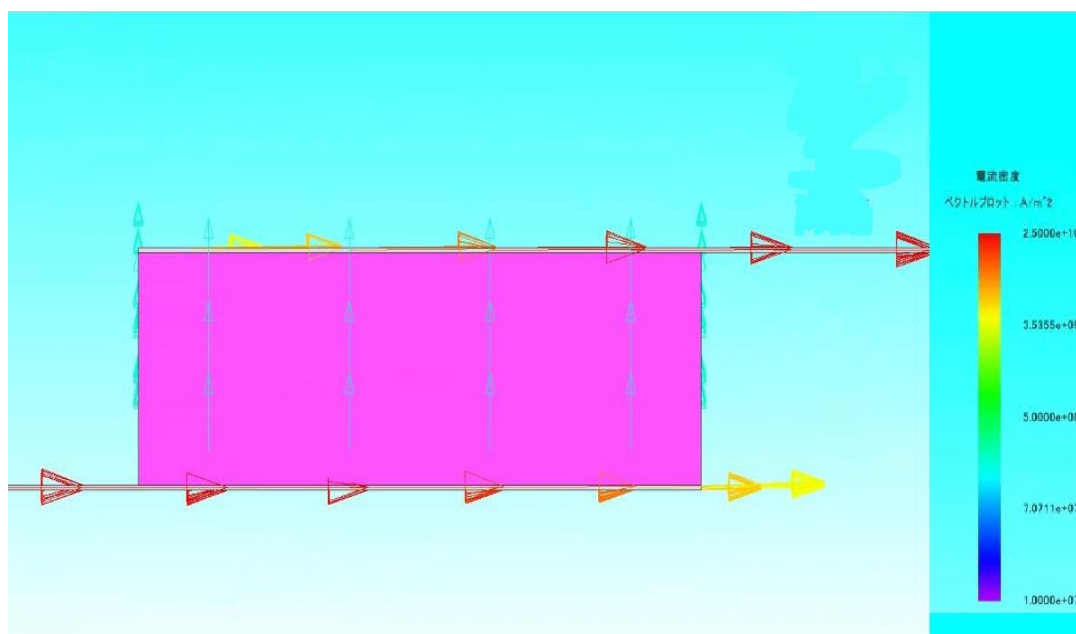


図 3.12 超伝導薄膜のはんだ接合の電流密度分布

3.4.2 超伝導線材のはんだ接合

超伝導線材を使用した場合、モデルを図 3.13 に示す。各部分の色は前述と同様に灰色が超伝導薄膜、オレンジ色が銅層、紫色がはんだである。超伝導薄膜、銅層とはんだの厚さはそれぞれ $1\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ と $50\ \mu\text{m}$ である。

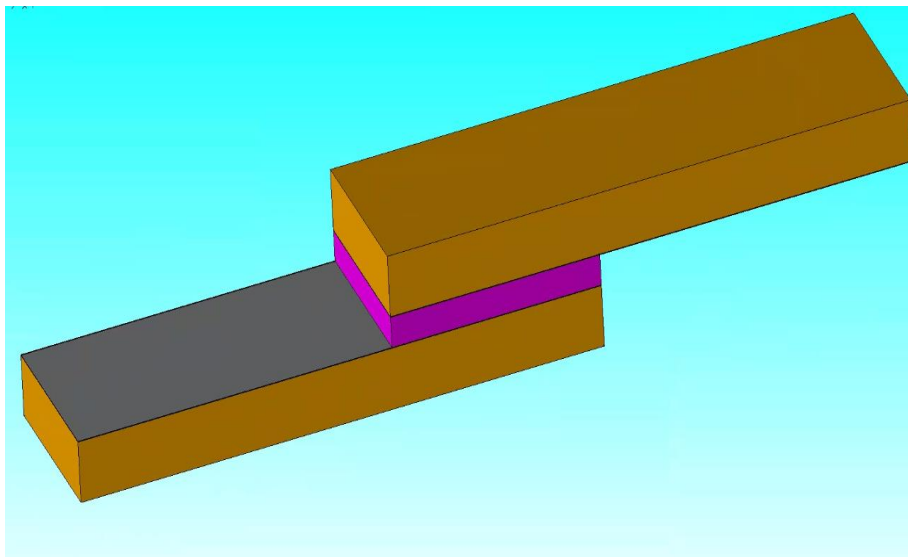


図 3.13 超伝導線材のはんだ接合モデル

超伝導線材はんだ接合の電気特性を図 3.14 に示す。超伝導薄膜のはんだ接合の結果と同じ、大きい電気抵抗が見える。はんだ接合が実際に実行すると簡単だが、電気抵抗が大きいとエネルギー損失が接合数によって少しずつ増加する。

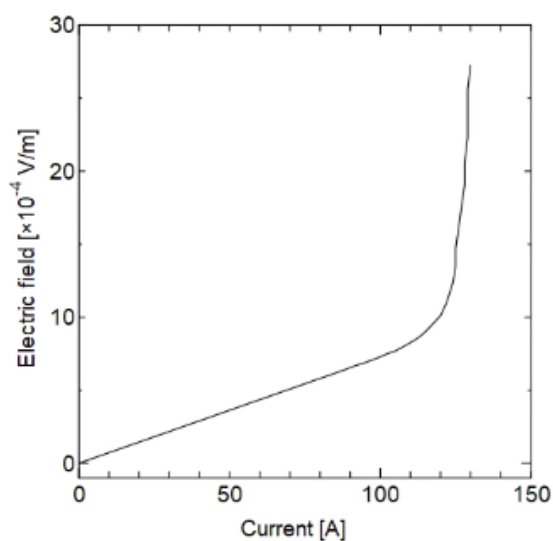


図 3.14 超伝導線材はんだ接合の電気特性

電流密度分布の結果を図 3.15 に示す。図 3.4 と比較すると、はんだ上部の銅部分の上方向の電流密度の流れも見られる。銅に流れている電流は超伝導体部分に流れている電流と比較すると小さいものであるが、はんだ部分における電流の流れの影響を受けて上方向の流れが生まれていると考えられる。

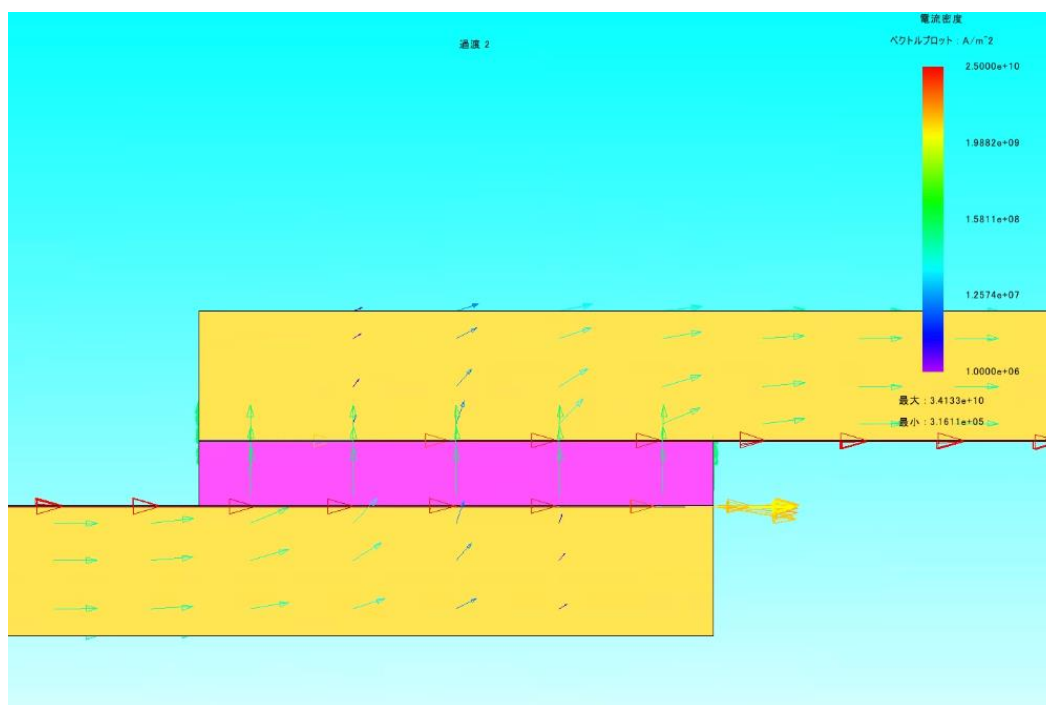


図 3.15 超伝導線材はんだ接合の電流密度

3.5 はんだを用いて臨界電流 I_c の補修

3.2 節の結果より、クラックの長さによって、接合部の臨界電流が下がっていることが分かった。クラックが大きすぎる場合、超伝導線材が使えなくなる。この問題を解決するためには、接合部の臨界電流 I_c の補修が必要である。

最初に、実際に簡単に使えるはんだを用いて接合部の補修を行う。本解析で使ったはんだの電気抵抗率は前述と同様に $1.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ ため、電流が流れにくい。そのため、はんだの上にもう一層の超伝導薄膜をつけている。解析に使ったモデルを図 3.16 に示す。灰色の平板は超伝導薄膜で、黄色の部分のはんだ層である。下の超伝導薄膜にある小さな口は接合部のクラックを表示している。3.4 で計算した結果により、はんだの電気抵抗が大きいと臨界電流 I_c の補修が困難であると考えられる。ここでは電気抵抗を小さくなるため、この解析で設定したはんだの厚さは $2-30 \mu\text{m}$ とする。実際のはんだの厚さは薄くても $10 \mu\text{m}$ 程度であり、 $2 \mu\text{m}$ を実現するのは難しい。

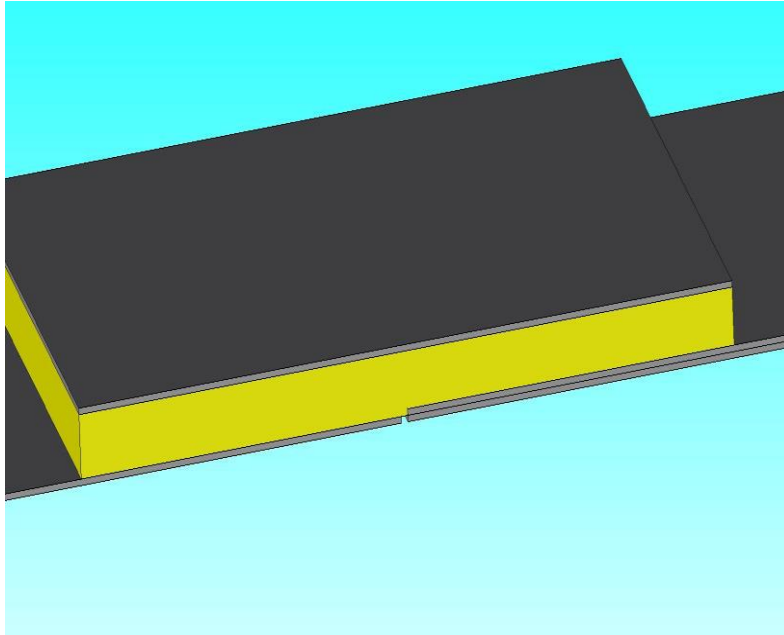


図 3.16 はんだを用いる補修のモデル

解析の結果を図 3.17 に示す。緑の線ははんだ厚さ $30\ \mu\text{m}$ の結果で、電気抵抗が大きいいため、補修の効果があまり良くない。赤い線を示すのははんだ厚さ $2\ \mu\text{m}$ の結果で、電気抵抗が下がったため、補修の効果が高く、臨界電流が回復し補修の効果が確かめられた。

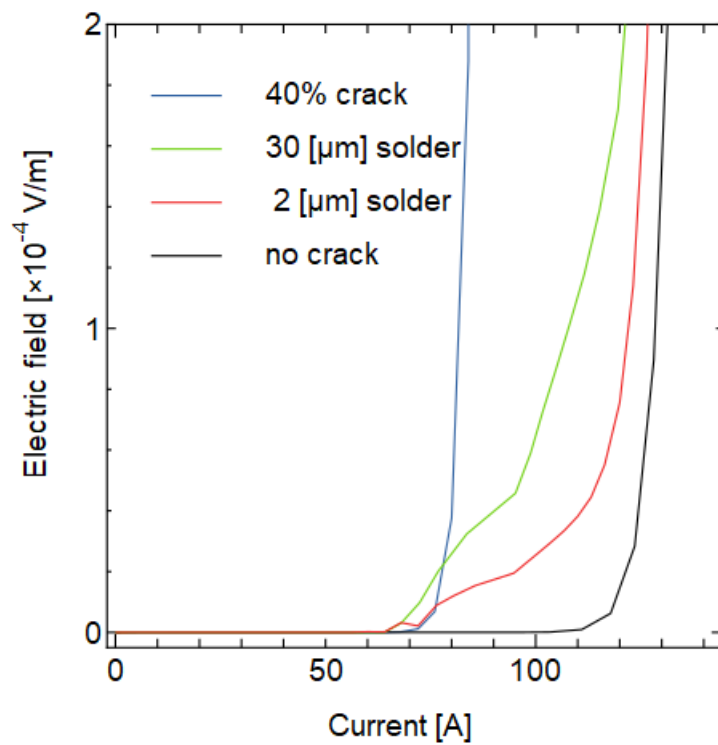


図 3.17 はんだを用いる補修の電気特性

3.6 CC – CC 銀拡散接合

はんだを用いる補修の結果より、使用した材料の電気抵抗が小さいほど、臨界電流 I_c の修復への効果が高くなる。こういう原因で、低抵抗接続の補修方法を考えた。超伝導線材には、厚さ $5\mu\text{m}$ の銀層が被覆されている。ここで、超伝導線材の銀層と銀層の接続を考えている。本解析で使った銀層の電気抵抗率は $1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ である。解析で行ったモデルを図 3.18 に示す。2.5.6 節で説明したモデルの概念図と同様に、本モデルは白い銀層と灰色の超伝導薄膜とオレンジ色の銅層で構成されている。真ん中にある穴はクラックである。

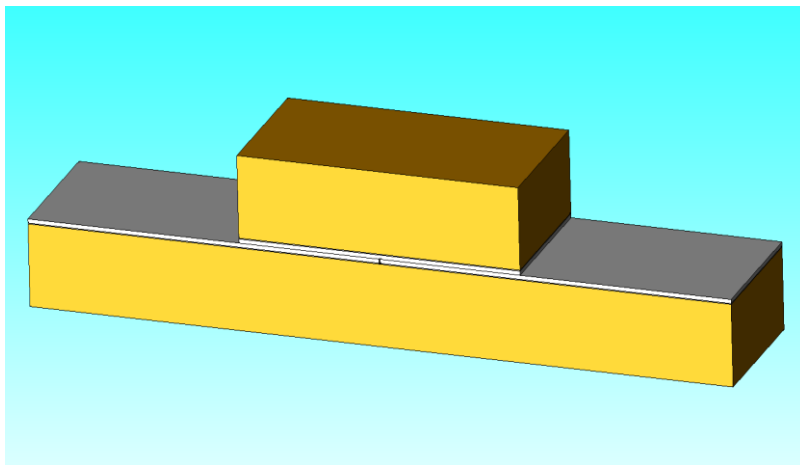


図 3.18 CC – CC 銀拡散接合のモデル

CC – CC 銀拡散接合の電気特性の結果を図 3.19 に示す。青い線は 40% crack を有する超伝導線材の結果で、赤い線は CC – CC 銀拡散接合補修の結果である。この結果より、厚さが薄いはんだを使うよりも臨界電流が回復しており、補修の効果が高い。

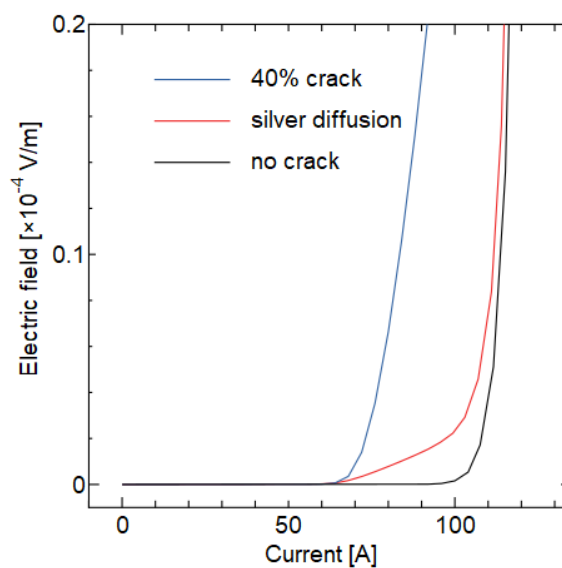


図 3.19 CC – CC 銀拡散接合の電気特性

3.7 ケーブル接続

ケーブル接続の中にある一本の超伝導薄膜の電流密度分布を図 3.20 に示す。この図は図 2.21 に示す部分モデルが鏡面对称をした後、下から上に見る平面図である。電流が左から右に流れ、中間の銅層とはんだ層に通過した様子となる。

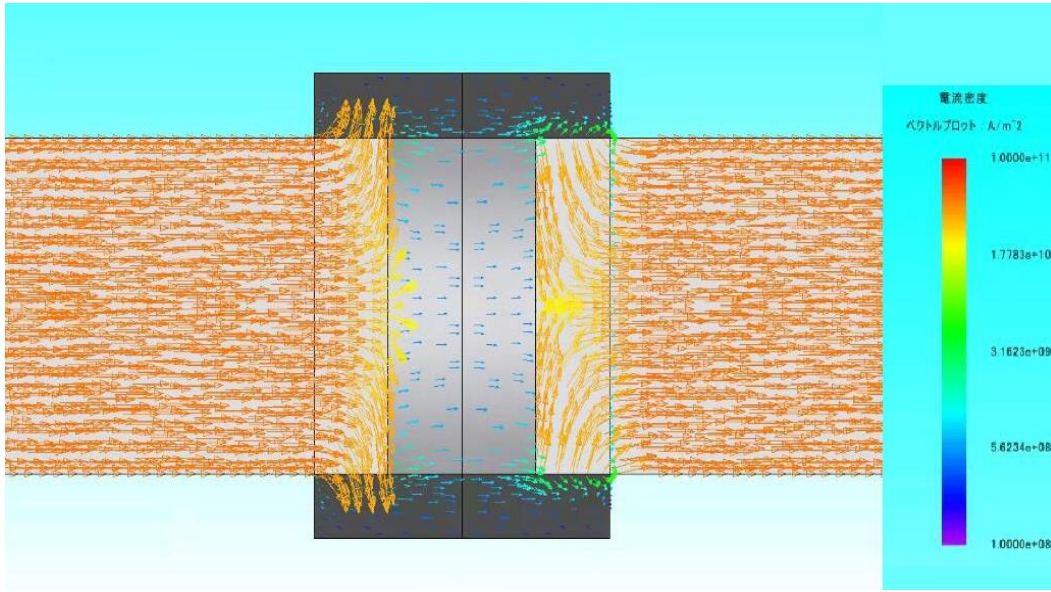


図 3.20 ケーブル接続部分モデルの電流密度分布

ケーブル接続全体的な電流密度分布を図 3.21 に示す。実際にあるケーブルのモデルではないが、このように、薄膜や線材の接合だけでなくケーブル状の接合もシミュレーションすることができる。

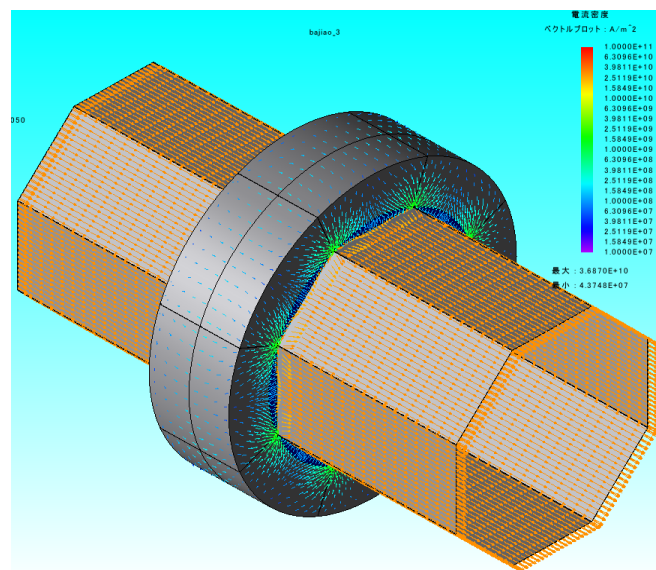


図 3.21 ケーブル接続全体の電流密度分布

第4章 結論

本研究では、FEM を用いて超伝導薄膜と超伝導線材の接合を解析し、様々な条件で超伝導接合における電気特性を調査した。また、接合部に力を受ける時、クラックが発生する場合の電気特性と及び臨界電流を増加させるための補修方法を調査した。FEM 計算を使用することで、複雑なモデルでも解析できるし、実際に試料を製作して実測するよりも時間的・金銭的コストをかけずに電気および機械の物理現象の解析が可能となった。

解析では、厚さ $1\ \mu\text{m}$ の超伝導薄膜と厚さ $100\ \mu\text{m}$ の銅層を基本として、クラックを有する接合及び臨界電流の補修を行った。最初に JMAG の正確性を検証し、超伝導計算ができることが分かった。また、COMSOL より計算した機械特性の結果からクラックが発生する原因を説明した。接合方法には超伝導接合とはんだ接合二つの方法がある。超伝導接合の場合、超伝導薄膜接合と超伝導線材接合及びクラックが発生する状態で解析を行った。はんだ接合の場合、厚さ $50\ \mu\text{m}$ のはんだ層を入れて解析を行った。補修方法にもはんだ補修と低抵抗接続補修の二種類である。はんだ補修の場合、はんだ層の厚さを減少することで電気抵抗が下がり、臨界電流へ修復を行った。低抵抗接続補修の場合、超伝導線材の銀層を通じて接続し、低抵抗接続を実現する。また、ケーブル接続の一例として、解析を行った。

本実験において、まず超伝導接合の機械的特性をシミュレートし、応力密度の分布からクラックが発生しやすい部分を捕捉した。超伝導接合の場合、超伝導薄膜接合と超伝導線材接合を数値シミュレーションし、超伝導接合の電気特性を得た。続いて、クラックを有するモデルを数値シミュレーションするために、超伝導膜に 10% のクラック、40% のクラックと 80% のクラックを導入した。クラックの長さを大きくなることにより、臨界電流が大幅に減少した。たとえば、クラックが 80% の場合、電流はクラックがない臨界電流値の約 20% であることが分かった。また、接合部周囲の電流がクラックを避けて、クラック上の開口に通過することが分かった。次に、接合部の形状を台形接合部に変更し、クラックの長さを減少することを目指した。機械特性の結果から台形接合部にある赤い領域は、長方形接合部により小さいことがわかった。したがって、クラックは小さく、より高い臨界電流が維持されたと考えていた。結果としては、台形接合部の電気特性は長方形接合部とほぼ一致しており、クラックによって臨界電流も下がっている。さらに、台形接合部の電流は、長方形接合部の電流と同様であった。はんだ接合の場合、超伝導接合と同じ方法ではんだ接合の電気特性を得た。はんだ接合の結果より、はんだ部分の電流抵抗が大きいことで、エネルギー損失が増加することが想像できる。はんだ接合の電流密度分布を見ると、はんだ部分における電流の流れの影響を受けて上方向の流れが生まれていると考えられる。クラックによって、臨界電流への影響を解明した後に、はんだと超伝導薄膜を用いてクラックを補修することが考えた。はんだ接合の結果より、電気特性を下がるため非常に薄いはんだを選べ、補修効果が大

幅に改善された次に、低抵抗接続を実現するため、銀層を介して2つの超伝導線材を接続した。CC-CC 銀拡散接合部の補修効果が明確で、非常に薄いはんだによりも優れていた。この接合方法は、鉄道システムなどの現場作業により適していると考えられる。最後に、ケーブル接続の解析を行い、リング状ケーブルモデルを解析できることが分かった。将来、超伝導ケーブルより、長距離送電の実現を期待できる。

これらのモデルの研究結果から、超伝導体の解析や FEM の有用性と正確性などが確認できた。今後は、超伝導接合の臨界電流とラップ長及び有効率の関係に関して、自由な形状を作成できる FEM 計算によって、より複雑な形状の接合モデルの模索が考えられる。

参考文献

- [1] T. Machida, Y. Kohsaka, K. Matsuoka, K. Iwaya, T. Hanaguri and T. Tamegai, *Nature Communications* **7** 11747(2016)
- [2] H. Fuji, T. Izumi and Y. Shiohara, *J. Japan Inst. Metals* **66** No. 4 207-213(2002)
- [3] M. Tomita *Railway Research Review* **70** No. 10(2013)
- [4] JMAG Simulation Technology for Electromechanical Design, 「JMAG とは」
<<https://www.jmag-international.com/jp/products/index.html>>
- [5] Platform Product: COMSOL MULTIPHYSICS®
<<https://www.comsol.jp/comsol-multiphysics>>
- [6] 松下照男, 「磁束ピンニングと電磁現象」, 産業図書(1994)
- [7] Y. J. Park, M. Lee, H. Ann, Y. H. Choi and H. Lee *NPG Asia Materials* **6** e98(2014)
- [8] X. Jin, Y. Yanagisawa, H. Maeda and Y. Takano *Supercond. Sci. Technol.* **28** 075010(2015)
- [9] FURUKAWA Electric HP
<https://www.furukawa.co.jp/what/2016/kenkai_160427.htm>
- [10] K. Ohki, T. Nagaishi, T. Kato, D. Yokoe, T. Hirayama, Y. Ikuhara, T. Ueno, K. Yamagishi, T. Takao, R. Takao, H. Maeda and Y. Yanagisawa *Supercond. Sci. Technol.* **30** 115017(2017)
- [11] E. H. Brandt and M. Indenbom *Phys. Rev. B* **48** 12893(1993)
- [12] SUMITOMO Electric <<https://sei.co.jp/super/hts/guide.html>>
- [13] M. Friesen and A. Gurevich *Phys. Rev. B* **63** 064521(2001)
- [14] S. I. Kim, F. Kametani, Z. Chen, A. Gurevich, D. C. Larbalestier, T. Haugan and P. Barnes *Appl. Phys. Lett.* **90** 252502(2007)
- [15] M. Inoue, K. Tanaka, K. Imamura, K. Higashikawa, S. Awaji, K. Watanabe, T. Taneda, Y. Yoshizumi, T. Izumi and T. Kiss *Phy. Procedia* **67** 903 – 07(2015)
- [16] M. Tomita, K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka and Y. Kobayashi *Energy* **122** 579 – 87(2017)

謝辞

まず、九州工業大学大学院 情報工学研究院 物理情報工学研究系 エレクトロニクス分野、小田部荘司教授にお礼申し上げます。超伝導体の基礎や解析の方向性、学会等について様々な面で多く助言いただきました。研究に限らず、普段の生活での振る舞い方など様々な経験をさせていただけたこと、深く感謝いたします。

九州工業大学 情報工学研究院 電子情報工学研究系 エレクトロニクス分野 松下照男名誉教授にお礼申し上げます。超伝導現象に関して、私が知らない知識を補っていただき、また貴重な資料等を見せていただけたこと、深く感謝いたします。

この研究は、JST 未来社会創造事業、JPMJMI17A2 の支援と JSPS 科研費 19H00771 の助成を受けて実施したものであり深く感謝いたします。

また、鉄道総合技術研究所の富田優様、赤坂友幸様、石原篤様にお礼申し上げます。研究の方向性について教えてくださり深く感謝いたします。

最後に、お世話になった小田部研究室の皆様、そしてここまで育て、支えてくれた家族に深く感謝いたします。

研究業績

発表

1. 張 睿哲, 小野又 美咲, 木内 勝, 鈴木 恵友, 田中 佑季, 中島 秀隆, 小田部 荘司
「FEMによる超電導バルクを用いた磁気研磨装置の評価」2018年度春季(第96回)低温工学・超電導学会, 東京都タワーホール船堀, 平成30年5月29日
2. 張 睿哲, 小野又 美咲, 木内 勝, 鈴木 恵友, 田中 佑季, 中島 秀隆, 小田部 荘司
「FEMによる超電導バルクを用いた磁気研磨装置の評価」低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2018年度若手セミナー・支部研究成果発表会, 島根大学松江キャンパス, 平成30年8月27日
3. 張 睿哲, 木下 雄士, 小田部 荘司, 赤坂 友幸, 石原 篤, 富田 優「FEMを用いたYBCO線材の超電導接合の評価」2018年度秋季(第97回)低温工学・超電導学会, 山形テルサ, 平成30年11月20日
4. Ruizhe Zhang, Yushi Kinoshita, Edmund Soji Otabe, Tomoyuki Akasaka, Atsushi Ishihara, Masaru Tomita “Evaluation of Critical Current Superconducting Junction with a Crack by Using FEM”, 32nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, Miyako Messe, December 3, 2019
5. Ruizhe Zhang, Yushi Kinoshita, Edmund Soji Otabe, Tomoyuki Akasaka, Atsushi Ishihara, Masaru Tomita “Evaluation of Critical Current of Superconducting Junction with a Crack by Using FEM”, 10th ACASC/ 2nd Asian-ICMC/ CSSJ Joint Conference, Okinawa Convention Center, January 9, 2020