

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：57601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560318

研究課題名（和文）

ケーブル導体を構成するための超電導線材の開発

研究課題名（英文）

Development of superconducting wires for fabrication of a cable conductor

研究代表者

野地 英樹 (NOJI HIDEKI)

都城工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号：30280340

研究成果の概要（和文）：長さ 300 mm の超電導ケーブル導体を作製するために、テープの断面サイズが幅 2 mm、厚さ 0.2 mm で、長さが 500 mm の 7 芯 Bi-2223 超電導テープを作製した。一次焼結の条件を大気中で 850 °C × 50 h、二次焼結の条件を大気中で 836 °C × 100 h にして焼結を行ったときに、臨界電流 ( $I_C$ ) の最大値が得られた。長さ 500 mm のテープで得られた  $I_C$  の最大値は 3.8 A であり、長さ 50 mm のテープでは最大 6.1 A が得られた。

研究成果の概要（英文）：The Bi-2223 superconducting tapes with seven filaments were fabricated to construct the superconducting cable conductor with 300 mm in length. The sizes of the cross section of the tapes are 2 mm in width and 0.2 mm in thickness, and the length of the tapes is 500 mm. The sample fabricated by the first sintering condition of 850 °C and 50 h in air and the second sintering condition of 836 °C and 100 h in air showed the best critical current ( $I_C$ ) property. The maximum  $I_C$  value was 3.8 A for the tape with 500 mm in length and 6.1 A for the tape with 50 mm in length.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器・超電導電力ケーブル・超電導線材

## 1. 研究開始当初の背景

(1) エネルギー利用効率化の促進と低炭素化による地球環境問題への対策の観点から、送電損失を大幅に低減することが可能な超電導電力ケーブルの早期実現が望まれている。国内では、住友電工と古河電工が超電導電力ケーブルを製作している。住友電工は、①東京電力と共同開発した 100 m 超電導ケーブル実証試験、韓国 KEPCO 向け 100 m 超電導ケーブル実証試験、米国 ALBANY プロジ

ェクトにおける 350 m 超電導ケーブル実証試験に成功している。さらにこれらの成果を踏まえて、平成 19 年度から 5 カ年計画で実施する②NEDO 委託の 200～300 m 超電導ケーブル実証試験を現在行っている。一方、古河電工は③NEDO 委託の Super-ACE プロジェクトにおける 500 m 超電導ケーブル実証試験に成功し、④YBCO 超電導線材から構成された 300 mm モデル・ケーブル導体で世界最小の交流損失を達成している。米国では AMSC 社

/NEXANS社/Air Liquid社が610 m超電導ケーブル実証試験を実施している。また、韓国ではLG Cable社が30 m超電導ケーブル実証試験を実施している。さらに、中国では中国科学院電工研究所が10 m超電導ケーブルの試験運転に成功している。

(2) 国際的に超電導ケーブルの実証試験が行われている中で、実用化への大きなカギとなるのが交流損失の低減である。当研究者は、ケーブル導体の交流損失解析法として電気回路モデルによる計算法を提唱しており、上記実証試験中、①、③、④のケーブル導体の交流損失について計算結果が測定結果と一致することを確認している。また①に対する結果では、同計算法により超電導線材の最適巻線ピッチを設計し、その設計に従うことで交流損失が低減できることを提唱している。①の超電導ケーブルは②の超電導ケーブルと同一構造なので、ケーブル構造の設計変更による交流損失低減の示唆は計画実施に大きな影響を与えるであろう。さらに④に対する結果では、次世代YBCO超電導線材で構成されたケーブル導体においても交流損失が低減できることを提唱している。

## 2. 研究の目的

(1) 当研究者が提案している計算法を確立することは、最小送電損失を持つ超電導ケーブルの設計法を確立することに繋がる。電気回路モデルによる計算法を実証するため、長さ300 mm、3層構造のモデル・ケーブル導体を作製し、4端子法により交流損失を測定して計算結果と比較する必要がある。このモデル・ケーブル導体を作製するためには、長さ500 mm、臨界電流値10 AのBSCCO超電導線材が85本必要になる。したがって、H21年度～H23年度の研究期間内に次の3つの要件を満たすBSCCO超電導線材を開発する。①線材サイズが長さ500 mm、幅2 mm、厚さ0.2 mmであること、②自己磁界中で臨界電流値10 A以上であること、③曲げ直径35 mmの曲げ歪まで臨界電流値の劣化がないこと。当研究室では、これまで長さ50 mm(幅2 mm、厚さ0.2 mm)、19芯フィラメント、臨界電流値3.5 A、臨界電流密度6 kA/cm<sup>2</sup>のBSCCO超電導線材を開発している。要件①を満たすために、大型環状炉を導入して焼結を行う必要がある。また要件②を満たすために、7芯フィラメントにすることによって超電導線材断面における超電導体占有面積比を増加させ、Powder-in-Tube法による超電導線材の加工法の最適化と焼結条件の最適化を行う。さらに要件③を満たすために、金属テープで補強した超電導線材を開発して曲げ歪に強い構造とする。

(2) 超電導線材を集合した導体の交流損失計算法は、先ず超電導線材に印加される磁界を求め、それから超電導線材の磁化損失を求めて加算する方法が一般化している。この計算法に従うと、超電導線材単体の交流損失と比較して、導体を構成している超電導線材の交流損失は小さくなるという結果が得られる。これが正しければ、導体の交流損失は超電導線材単体の交流損失を加算した値より低くなるはずであるが、この計算結果に実験的な裏付けはない。それに対して当研究者は、導体を構成している超電導線材の交流損失は単体のものと同一であると仮定して独自の計算方法を開発し、その計算結果が実験結果と一致することを報告している。さらに最適巻線ピッチにすることにより交流損失が低減できることを提唱している。当研究者の計算法は、特許出願されている。本研究の実施は、超電導ケーブル導体の交流損失計算法の確立に繋がり、最小交流損失を持つ超電導ケーブル導体の設計法の確立に貢献するものである。

## 3. 研究の方法

(1) 平成21年度：住友電工が作製した30 m超電導ケーブル(現在、研究開発が行われている200～300 m超電導ケーブルと同一構造)に対して行った数値計算の結果、最小交流損失を与える各層の最適巻線ピッチの中で、最小巻線ピッチは200 mmであった。これより、モデル・ケーブル導体の長さは300 mmあれば良いと考えられる。また、古河電工が作製したYBCO超電導モデル・ケーブル導体も長さ300 mmであることから、本研究で開発を目指すケーブル導体の長さを300 mmに設定する。モデル・ケーブル導体を構成するBSCCO超電導線材は、ケーブル導体両端の電流端子の長さ等の余剰長さを考慮して長さ500 mmが必要である。一般的なBSCCO超電導線材の幅は4～5 mmである。ただし、ケーブル導体を構成する場合、線材幅が大きいと線材の幅方向に大きな曲げ歪がかかってしまう。そのため、YBCO超電導線材ではレーザーで切断することにより幅2 mmのスリム線材を作製し、ケーブル導体が製作されている。よって本研究ではBSCCO超電導線材の幅を2 mmとする。また、一般的なBSCCO超電導線材の厚さは0.2 mmであるため、本研究でも超電導線材の厚さを0.2 mmとする。

(2) 平成22年度：最先端BSCCO超電導線材の臨界電流値は、幅2 mmとして換算すると45 Aである。一方、国内の大学で作製されたBSCCO超電導線材の臨界電流値は10 Aと見積もられる。それに対して、当研究室がこれ

まで開発した BSCCO 超電導線材の臨界電流値は 3.5 A である。本研究の達成レベルは、国内大学レベルに設定されている。臨界電流値 10 A を達成するために、次の(a)~(c)の研究開発を行う。まず、(a) 線材加工時の線引き速度の最適化を行う。当研究室では、H20 年度に科研費によって線引き機にインバータの導入を行い、0.3~3.5 m/min の速度調整が可能になった。線引き速度を最適化することで超電導体の相対密度の向上が期待される。さらに、(b) 1次および2次焼結の焼結方法最適化を行う。当研究室では、1次焼結および2次焼結は 840 °C×100 h としている。それに対して、焼結条件を最適化することにより、臨界電流密度は 25 kA/cm<sup>2</sup> まで向上可能であることが報告されている。文献の情報を参照・導入することで結晶粒の配向性・結合性の向上および不純物相の低減が期待される。最後に、(c) 超電導線材断面における超電導体占有面積比を増加させる。当研究室で開発された 19 芯 BSCCO 超電導線材において、超電導体占有面積比は 20 % であり、線材に占める超電導部分の比が非常に小さい(残り 80 % は Ag 母材が占める)。現有機器で加工を行うためには、Ag パイプ最大外径 6 mm、肉厚 1.0 mm が限界である。そのため、この条件で超電導体占有面積比を向上させるには、多芯線の芯数を 19 芯から 7 芯に低減する必要がある。Ag と超電導体の延性の違いから、フィラメント径が大きくなるほど超電導体占有面積比が大きくなる傾向があるため、芯数を低減することでフィラメント径を大きくし、超電導体占有面積比を大きくする。

(3) 平成 23 年度：ケーブル導体の構成において、外径 20 mm の G-FRP フォーマに最小巻き線ピッチ 200 mm で超電導線材を巻きつける必要がある。このとき、曲げ直径 35 mm の歪が超電導線材にかかる。曲げ歪に強い超電導線材の開発としては、線材の多芯化、Ag 母材の合金化が行われてきたが、近年では金属テープによる補強が行われている。本研究でも金属テープによる補強を行う。厚さ 40 ~ 100 μm のステンステープを超電導線材の上下から挟み、半田接合して強化線材を開発する。半田接合するために、厚さ 10~50 μm の半田箔を超電導線材とステンステープの間に挟み、過熱-冷却することで接合を行う。過熱は 300~400 °C で数分行う。冷却時に超電導線材、半田、ステンレスの熱収縮率の違いによる湾曲を防ぐため、冷却速度 1 °C /min 以下で冷却する。

#### 4. 研究成果

(1) 平成 21 年度: ①短尺テープ(長さ 50 mm) について次の研究を行った。一次焼結を大気

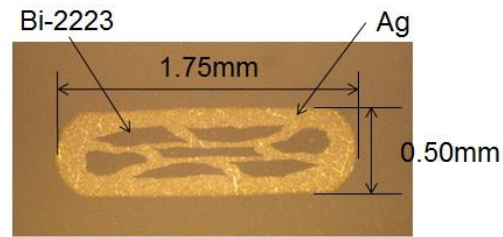


図 1 一次焼結後の線材断面写真

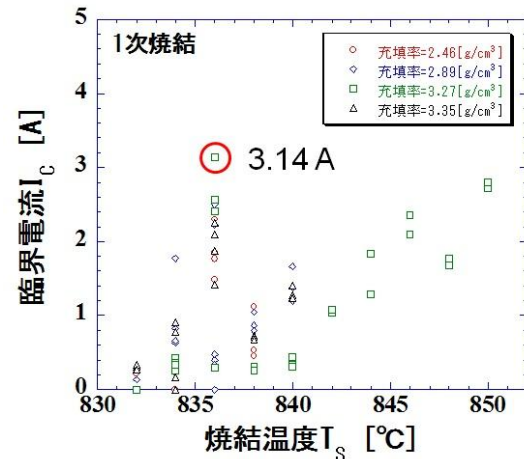


図 2 一次焼結温度に対する臨界電流値

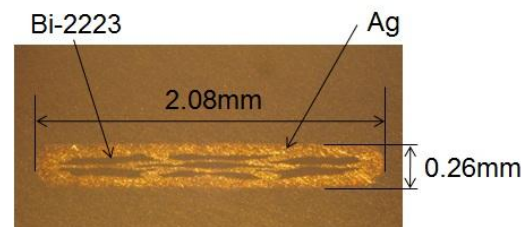


図 3 二次焼結後の線材断面写真

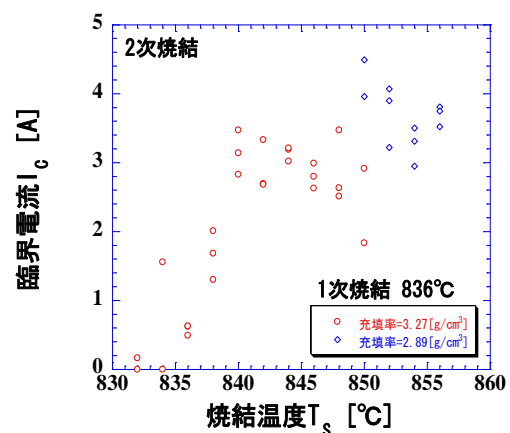


図 4 二次焼結温度に対する臨界電流値

中で 830 °C~850 °C の範囲で行った。このとき、テープ幅は 1.75 mm、厚さは 0.50 mm である。このときのテープ断面写真を図 1 に示す。また、一次焼結温度に対する臨界電流値の特性を図 2 に示す。この結果より、最適な一次焼結温度を 836 °C とし、二次焼結を大気中で 830 °C~860 °C の範囲で行った。このとき、テープ幅は 2.08 mm、厚さは 0.26 mm である。このときのテープ断面写真を図 3 に示す。また、二次焼結温度に対する臨界電流値の特性を図 4 に示す。二次焼結では 850 °C 付近で高い臨界電流値  $I_c$  が得られ、最大値は  $I_c = 4.5$  A であった。 $I_c$  に対する超電導粉末充填密度の影響を調べるため、2.46 g/cm<sup>3</sup>~3.35 g/cm<sup>3</sup> の充填密度範囲で短尺テープを作製したが、 $I_c$  に与える影響は確認できなかった。さらに、SQUID で臨界温度  $T_c$  と不可逆温度  $T^*$  測定したところ、 $T_c = 107\sim 109$  K であり  $T^* = 68\sim 70$  K であることがわかった。SQUID によって測定した磁化 - 温度特性を図 5 に示す。住友電工(株)製超電導テープの特性は、 $T_c = 119$  K と  $T^* = 80$  K であることから、本研究室で作製した超電導テープは酸素濃度の調整が不十分なことと、ピンニング特性が不十分であることが分かる。

②長尺テープ（長さ 500 mm）について次の研究を行った。ローラーで圧延する際にテープが曲がってしまうため、ローラー出口にガイドを挿入することによりテープの曲がりを防いだ。その結果を図 6 に示す。図 6 中、上がガイドを使わないで作製したテープで

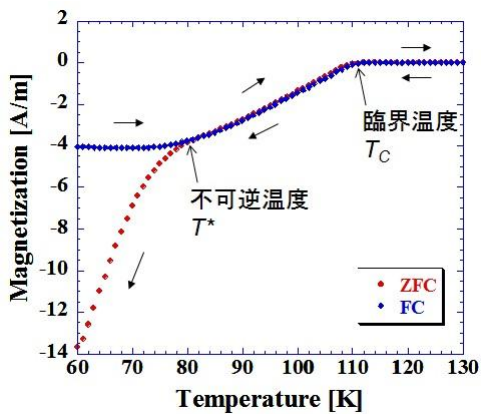


図 5 超電導テープの磁化 - 温度特性

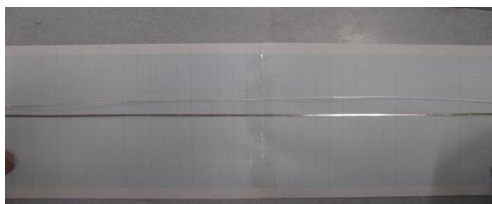


図 6 曲がりを防いだ長尺テープ

あり、下がガイドを使って作製したテープである。大気中において、一次焼結を 836 °C、二次焼結を 850 °C で行い、最大  $I_c = 3.8$  A が得られた。長尺テープを長さ方向に十分割し（長さ各 50 mm）、テープの長さ方向に対する電流値の分布を調査した結果、両端部の  $I_c$  が高く ( $I_c = 5.2$  A)、中央部の  $I_c$  が低いという結果になった。この結果を図 7 に示す。

(2) 平成 22 年度：①短尺テープについて次の研究を行った。テープ加工時の圧延速度は今まで 0.3 m/min であったが、速度を上げることによりテープ作製の効率を上げられるか調査した。圧延速度 0.3 m/min の場合、ガイドの使用により線材の長さ方向に対する左右への歪みは抑えられた。それに対して圧延速度を 1.5 m/min、2 m/min と速くした場合には大きな歪みが生じてしまい、 $I_c$  は最高でも 0.51 A とかなり低くなった。これより、圧延速度は 0.3 m/min の値を維持することにした。図 8 に圧延速度を上げた場合のテープの様子を示す。

②短尺テープについて次の研究を行った。一次焼結の焼結方法を変化させ、最適な焼結条件を調べた。一次焼結温度を 836 °C と固定し、一次焼結時間を 50 h と 100 h で変化させ

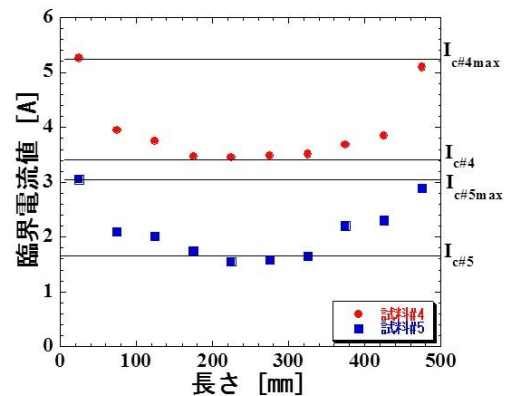


図 7 テープ長さ方向の臨界電流値分布



図 8 圧延速度が速い場合のテープ

テープを作製し、 $I_c$ を調べたところ、 $I_c$ の値は焼結時にはあまり依存せず2.6 A程度の値が得られた。これより、最適な一次焼結時間を50 hとした。また、一次焼結時間を50 hと固定し、一次焼結温度を836 °Cと850 °Cと変化させてテープを作製して  $I_c$ を調べたところ、あまり大きな差は見られなかった。どちらかといえば850 °Cで安定して高い値が得られ、最大値としては臨界電流値3.0 Aが得られた。これより、最適な一次焼結温度を850 °Cとした。

③長尺テープについて次の研究を行った。H21年度の研究結果で、長尺テープにおいて長さ方向に  $I_c$ の分布が見られたので、大型マッフル炉内の温度分布を調べた。マッフル炉の設定温度を836 °Cとしたとき、マッフル炉の入り口から奥までの間で(60 mm)、9箇所の温度を熱電対で測定した。その結果、マッフル炉内の温度は炉内中央のほうが高く、設定温度より平均して6 °C高いことが分かった。この結果を図9に示す。これより、目標温度に対して設定温度を6 °C低くすることにした。一次焼結の条件を836 °Cで100 hに固定し、二次焼結温度を836 °Cと850 °Cで焼結時間を50 hと100 hに変化させて4本の長尺テープを作製した。その結果、2次焼結を836 °Cで100 h行ったテープで、最大  $I_c$  値2.2 A、部分的(長さ50 mm)には最大4.2 Aが得られた。この結果を図10に示す。全ての試料において、昨年度よりも  $I_c$ のばらつきが抑えられた。

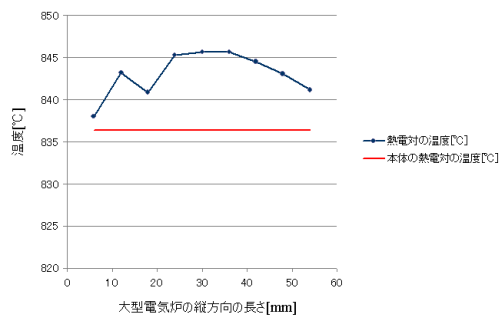


図9 大型マッフル炉内の温度分布

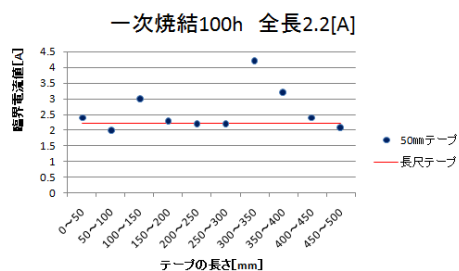


図10 長尺線材の臨界電流値

(3)平成23年度： $I_c$ 値が目標の10 Aに達しないのは、テープ加工時においてテープに部分的な傷が入って内部の超電導体が染み出すことか、またはフィラメントの形成が不全であることに原因があると考えた。そこで、フィラメント作製時の銀パイプの肉厚を0.75 mmと厚くした。そして、今までの肉厚0.50 mmの試料と比較し、肉厚が超電導線材の特性に与える影響を調べた。

①短尺テープについて次の研究を行った。線材断面の観察から、肉厚を増加したことで良好な状態でフィラメントを形成できることが分かった。肉厚0.5 mmの短尺テープを2バッチ(A0.5、B0.5)作製し、肉厚0.75 mmの短尺テープを3バッチ(A0.75、B0.75、C0.75)作製した。肉厚0.5 mmのテープでは、バッチによる平均  $I_c$ の違いが大きく、A0.5(8本)で2.2 A、B0.5(8本)で5.0 Aであった。この違いは、テープ加工時の何らかの原因でA0.5に歪み加わり、 $I_c$ が小さかったと考えられる(断面観察結果よりの推察)。B0.5では最大  $I_c$  値6.1 Aのテープが2本得られた。肉厚0.75 mmのテープでは、平均  $I_c$ がそれぞれ、A0.75(5本)で2.2 A、B0.75(5本)で3.7 A、C0.75(4本)で3.9 Aであった。母材である銀の肉厚が薄いほうが超電導体の断面積が大きくなるため、 $I_c$  値として有利であると考えられる。そのため、 $I_c$  値の向上という観点から考えると、厚さ0.5 mmの方が有利である。



(a) 肉厚 0.5 mm



(b) 肉厚 0.75 mm

図11 肉厚の異なるテープの外観

②長尺テープについて次の研究を行った。肉厚 0.5 mm で作製したテープには部分的に超電導体の染み出しが見られ、肉厚 0.75 mm で作製したテープには染み出しが見られなかった。この結果を図 11 に示す。次に、肉厚の異なる長尺テープに対して、部分的に 4 箇所  $I_c$  値を測定した結果を図 12 に示す。これより、肉厚 0.5 mm のテープの  $I_c$  値に比べて、肉厚 0.75 mm の方が  $I_c$  分布のばらつきが小さいことが分かる。長尺テープの端から端までの最大  $I_c$  値は、肉厚 0.5 mm で 1.6 A、肉厚 0.75 mm で 1.7 A であった。H21 年度の最大値が  $I_c = 3.8$  A、H22 年度が  $I_c = 2.2$  A であり、H23 年度には前年度までの最大値を超えることができなかった。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

①H. Noji, “AC losses in multilayer power transmission cables comprised of YBCO tapes”, *Physica C* **471** (2011) 995-998 : 査読有 doi:10.1016/j.physc.2011.05.108

[学会発表] (計 1 件)

①H. Noji, “AC losses in multilayer power

transmission cables comprised of YBCO tapes”, *International Symposium on Superconductivity*, 2 November 2010, Tsukuba (Japan)

[その他]

ホームページ・アドレス

<http://www.miyakonojo-nct.ac.jp/gaiyo/scholar/e/noji.html>

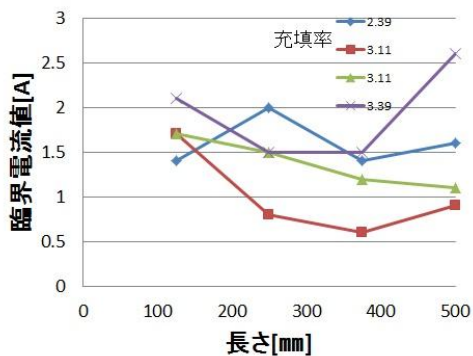
### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

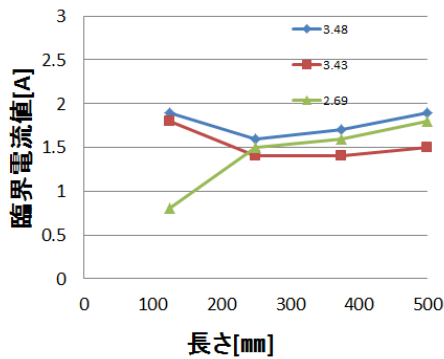
野地 英樹 (NOJI HIDEKI)

都城工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号 : 30280340



(a) 肉厚 0.5 mm



(b) 肉厚 0.75 mm

図 12 肉厚の異なるテープの  $I_c$  分布