

令和元年6月21日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06212

研究課題名(和文) 高温超伝導ケーブル内の各層に生じる交流損失に基づく損失低減のための設計法の開発

研究課題名(英文) Development of design of high temperature superconducting cable based on AC loss minimization in each layer

研究代表者

小川 純(Ogawa, Jun)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：60377182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々は形状の異なる超伝導ケーブルの各層の損失を熱的測定法により測定を行った。ケーブル内の電流バランスを変えることにより各層が作る合成磁界の大きさと方向が変化したときの影響について調査を行った。この合成磁界が外部磁界として働き交流損失特性に影響を及ぼすことを確認した。交流損失を低減するためにはこの合成磁界を小さくするか超電導線に平行となるように構成することにより損失を低減することが可能であることを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで超伝導ケーブルの交流損失はケーブル全体の損失は評価することができたが、ケーブル内の各層における交流損失の評価をすることができなかった。本研究では、熱的測定法を応用することによりケーブル内の各層における交流損失を測定することが可能となり、ケーブル内の電磁条件が交流損失特性に大きく影響を及ぼすことを示した。このことにより、超伝導ケーブルの損失を設計する指針として合成磁界の方向を重視することにより損失を低減することが可能であることが示された。超伝導ケーブルは電流容量が大きいことから次世代の電力ケーブルとしての役割を期待されており、今後実測のデータとして生かすことが可能である。

研究成果の概要(英文)：We measured the AC losses in each layer of a three-layer twisted HTS cable by using the calorimetric method. The transport current balance of HTS cable varied we investigated the influence of the amplitude and direction of the magnetic field to the AC loss characteristics. The composition magnetic field affected to the AC loss characteristics and when the direction of the composition magnetic field is parallel to the HTS tape axis, the AC losses was minimum. We present the possibility to reduce the AC losses in HTS cable, the amplitude of the composition magnetic field reduces, and the HTS tapes are placed parallel to the direction of the magnetic field.

研究分野：応用超伝導

キーワード：高温超伝導ケーブル 交流損失

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導ケーブルの開発は各国で進められており、交流を通电したときに生じる交流損失は定常的に生じ、ケーブルの性能に直結することから損失の低減が求められている。研究開発当初は超伝導ケーブルの交流損失の評価は入力した電力と出力される電力の差からケーブル全体の損失を評価することは行われていた。しかし、測定法が確立されていないためケーブル内部のどの個所においてどのように損失が生じているかはわからず、超伝導ケーブルの内の各層に生じる損失を実験により評価を行った前例がなかった。これまでケーブル内の損失分布に関しては数値実験でのみ行われており、直接ケーブル内の電磁条件が交流損失に及ぼす影響については解析をもとにした推測により検討が行われていた。

2. 研究の目的

本研究の研究目的は、超伝導ケーブル内における交流損失特性の把握を目的としている。このためには測定法の確立が急務であり、このためこれまで我々の研究室で開発してきた熱的測定法をアレンジし超伝導ケーブルを実際に作成し実験を実施した。ツイスト方向、ツイストピッチ、ケーブル内の磁界の影響について複数の超伝導ケーブルを作成し、ケーブル内の電流バランスを変化させ各層に生じる交流損失の影響について調査を実施した。

3. 研究の方法

超伝導ケーブル内の磁界の影響を調査するために2層ケーブルを3種類と3層ケーブルを作成した。表1に示すように2層ケーブルでは、Cable Aを基準として1層目のツイストピッチを固定し、2層目のツイストピッチを同じとして逆方向にツイストしたもの(Cable B)、ツイスト方向は同じでツイストピッチを倍としたサンプル(Cable C)を作成し、外層のツイストピッチとツイスト方向がケーブル内の各層の交流損失特性に及ぼす影響について調査を実施した。

また、超伝導ケーブルはツイストピッチにより電流バランスを変化させることが可能であることから、電流バランスを変化させた影響について調査を実施した。また、表2に示すように3層ケーブルを作成しそれぞれの層の電流バランスを変化させることによる影響を詳細に調査した。ケーブル内部の磁界分布は数値解析により実施し磁界の方向と大きさがケーブルを構成する超伝導線の交流損失特性に及ぼす影響について調査を行った。3層ケーブルでは3相交流通电を実施し、3相通电において損失がどのように生じるかを調査した。

前述したとおり、超伝導ケーブルのような円筒形のサンプルの交流損失を測定する方法を開発する必要があったため、図1に示すように測定区間を発泡スチロールで断熱し、交流損失による温度上昇を熱電対を用いて測定を行い、この温度上昇と交流損失の関係から超伝導ケーブル内の各層に生じる交流損失の評価を実施した。この測定により測定された交流損失は周波数に対し比例して増加することからヒステリシスの生じており、この特性は商用周波数程度での高温超伝導線の交流損失特性と合致していることから、超伝導ケーブルの交流損失の測定法の開発は成功したといえる。2層ケーブル、3層ケーブルともに各層に図1に示すような断熱区間を設け各層における交流損失を評価した。

4. 研究成果

図2に2層高温超伝導ケーブルの内外層それぞれに生じる交流損失特性を示す。超伝導ケーブル内では各層はツイストされていることから、自身の線の内側に超伝導ケーブルの軸に対し平行な磁界が生じ、外側に通电による周方向磁界が発生する。この磁界は他の層から見ると外部磁界とし

表1 2層高温超伝導ケーブルの緒元

	Cable A	Cable B	Cable C
Inner layer :			
Diameter	20 mm	20 mm	20 mm
Twist pitch	150 mm	150 mm	150 mm
Twist direction	S	S	S
Number of HTS tape	11	11	11
Critical current	151.0 A	151.0 A	151.0 A
Outer layer :			
Diameter	27 mm	27 mm	27 mm
Twist pitch	300 mm	150 mm	300 mm
Twist direction	Z	Z	S
Number of HTS tape	15	14	15
Critical current	184.2 A	157.5 A	188.1 A

表2 3層高温超伝導ケーブルの緒元

	First layer	Second layer	Third layer
Diameter	20 mm	27 mm	36.5 mm
Twist pitch	150 mm	200 mm	100 mm
Twist direction	S	S	Z
Number of HTS tape	11	15	14
Critical current	147.9 A	196.7 A	172.9 A
n value	19.4	20.4	18.8

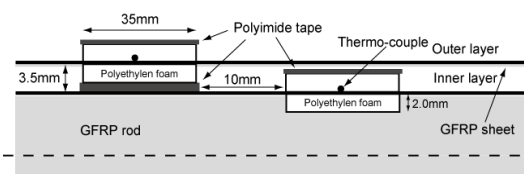


図1 超伝導ケーブルの測定区間の構成

て働くことが予想される。2層の超伝導ケーブルの場合には内層には外層が作る縦磁界と内層が作る縦磁界，周方向磁界の合成磁界が印加されている条件となる。外層の場合には内層が作る周方向磁界が印加されていると考えられる。図2より，内層の超伝導線は共通のツイストピッチであるため，外層が晒される磁界の方向と大きさは等しいため外層の損失に大きな変化は見られない。これに対し，内層の線の場合には外層のツイスト方向とツイストピッチが異なるため，外層に通電することによる縦磁界の方向と大きさが異なる。この関係性を図3に示す。Cable A~Cの合成磁界の大きさはほぼ等しい値であるが，磁界の方向が線軸に対し，Cable AとBは90度近く方向であり，Cable Cは50度近くとなっている。超伝導線に磁界を印加した場合には線軸に平行に磁界を印加したときのほうが垂直に磁界を印加した条件よりも損失が小さくなることからこの影響によりCable Cの内層の損失が小さくなっていることが考えられる。

また，3層ケーブルの場合には3相交流通電時の損失について測定を実施した。図4に3層超伝導ケーブルに同相通電を実施したときと3相交流通電を実施したときの各層に生じる交流損失特性を示す。3相交流通電の場合にはそれぞれの層に通電される電流は等しい値となることから，比較のため同相通電時も電流値は同じ値となるように通電を行った。1層目では，3相通電時に比べ同相通電時のほうが損失が大きくなっており，2層目3層目では損失の特性が逆転していることがわかる。この理由として，3相通電時の場合には超伝導線の軸を中心として回転磁界の条件となるため損失が増加した可能性がある。超伝導ケーブルで3相通電を実施する場合には合成磁界が回転する現象により損失が増加する現象があることに留意する必要があることが示された。ケーブル全体の損失を低減させる方法として周方向磁界と縦方向磁界の合成磁界が超伝導線に対し平行となるようにデザインすることにより損失を低減することができることが実験的に示された。

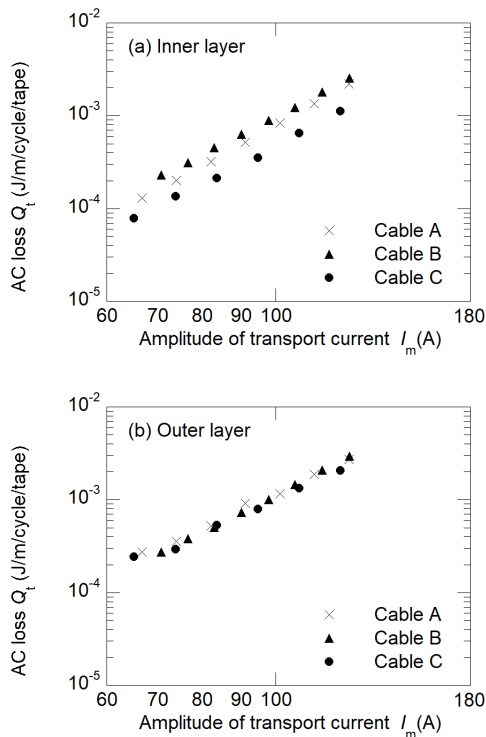


図2 2層高温超伝導ケーブルの各ケーブルにおける内層(a)と外層(b)の交流損失特性

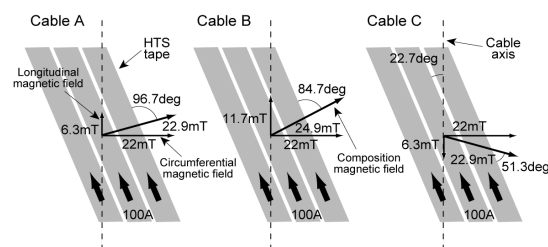


図3 2層高温超伝導ケーブルの内層における合成磁界

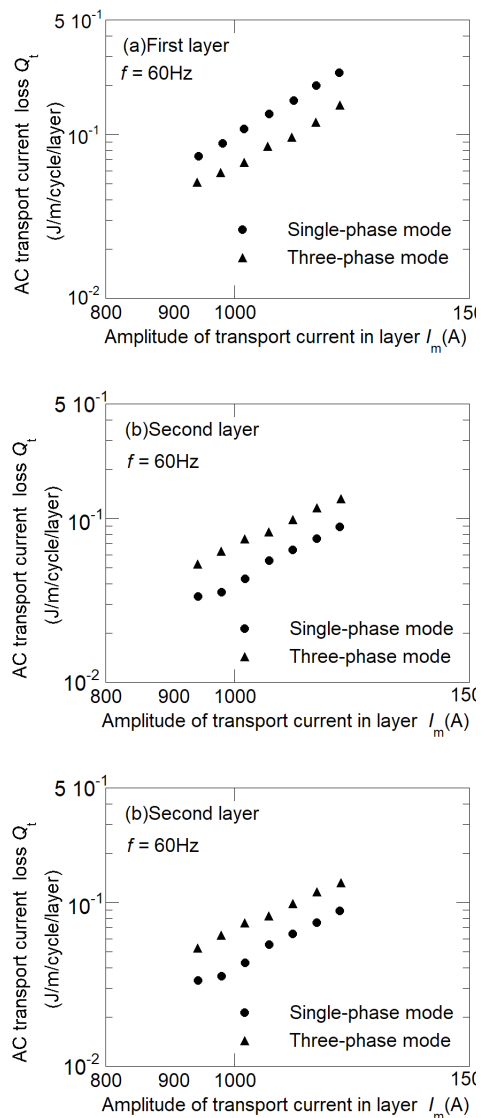


図4 3層高温超伝導ケーブルの同相通電と3相交流通電時の各層における交流損失特性

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

J. Ogawa, S. Fukui, M. Sugai, S. Aoyama, N. Koseki, T. Matsubara , IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 10.1109/TASC.2019.2901213(2019)

J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, Y. Panpan, K. Kanamori, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 10.1109/TASC.2017.2786708(2018)

J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Ogawa, M. Sugai, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 10.1109/TASC.2017.2776923(2018)

〔学会発表〕(計 8 件)

J. Ogawa, S. Fukui, M. Sugai, S. Aoyama, N. Koseki, T. Matsubara , Applied superconductivity 2018 , Seattle , 2018

J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Ogawa, M. Sugai , 25th International Conference on Magnet Technology , Amsterdam , 2017

J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, Y. Panpan, K. Kanamori , 25th International Conference on Magnet Technology , Amsterdam , 2017

Yan Panpan , 小川純 , 福井聡 , 岡徹雄 , 電気学会東京支部新潟支所大会 , 新潟大学 , 2017  
小川智也 , 東條竜児 , 菅井護 , 小川純 , 福井聡 , 岡徹雄 , 佐藤孝雄 , 電気学会超伝導応用電力機器研究会 , ときめいと , 2016

小川純 , 岩下遼介 , 杵淵修造 , Yan Panpan , 福井聡 , 岡徹雄 , 電気学会超伝導応用電力機器研究会 , 大阪大学 , 2016

小川純 , 福井聡 , 岡徹雄 , 岩下遼介 , 杵淵修造 , Yan Panpan , 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference , 金沢歌劇座 , 2016

岩下遼介 , 杵淵修造 , 小川純 , 福井聡 , 岡徹雄 , 電気学会東京支部新潟支所大会 , 長岡技術科学大 , 2016

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名： 小川 純

ローマ字氏名： (OGAWA, Jun)

所属研究機関名：新潟大学

部局名：自然科学系

職名：准教授

研究者番号 ( 8 桁 ) : 60377182

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。