

# 多重撚り線構造を有する低損失銀シース酸化物超電導線材の開発

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・電気・電子情報工学系・准教授 稲田 亮 史

## 1. 研究の目的

銀シース酸化物高温超電導線材を用いた大容量・省エネルギーかつコンパクトな高温超電導ケーブルの開発が国内外において進められている。しかしながら、交流運転時に発生する損失は依然として大きく、実用化に向けて、導体を構成する線材レベルでの損失を少なくとも現状の1/4程度まで低減する必要がある。電流容量の確保とコンパクト化を実現するため、超電導ケーブルは複数の線材を円筒フォーマ上に多層スパイラル状に巻きつけた導体構造となる。このため、ケーブル内において線材は主に線材幅広面に対して平行な横磁界中において電流を輸送する必要があり、各線材内では平行横磁界に対する磁化損失と輸送電流に対する通電損失が同時に発生することになる。磁化損失の低減には、超電導フィラメントに撚りを施すことが有効であるが、一般に用いられる一重撚り構造では(図1(a))、撚りを施していない線材と同様に外層のフィラメントのインダクタンスは内層よりも小さくなる。このインダクタンス不平衡に伴い、線材に電流を通電した際に外層フィラメントへの電流偏流が生じてしまい、結果として通電損失は殆ど低減できない問題がある。

本研究では、各フィラメントのインダクタンスを均一化し輸送電流の偏流を抑制するために、多芯化する前に複数のフィラメントを束ねて撚り、このフィラメント束を更に複数束ねて細線化した後で再度撚りを施して全てのフィラメントに転位を加えることにより(図1(b))、通電損失と磁化損失の低減を両立する多重撚り銀シース線材の開発を目的とする。

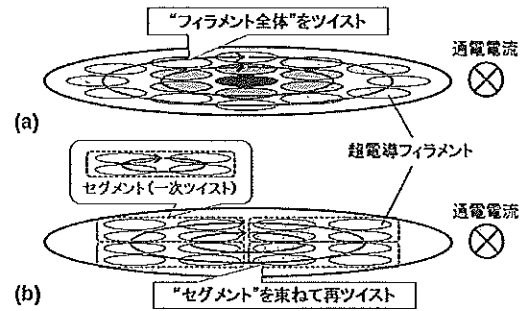


図1 (a)一重撚りおよび(b)二重撚り線構造

## 2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

### 2. 1. 実験方法

多重撚り線構造を有する銀シース線材は、パウダー・イン・チューブ法により作製した。図2に作製工程フローを示す。純銀パイプ(外径9.4mm, 内径8mm)にビスマス系酸化物超電導体( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ )の原料粉末を $2\text{g}/\text{cm}^3$ 程度で充填し、直径1.1mmまで細線化した。この単芯ロッドを4本束ね、一次撚り加工(撚りピッチ長8mm)した複合材(以後、セグメントと呼ぶ)とした。セグメント4式を束ね、銀-マグネシウム合金パイプ(外径9.4mm, 内径8mm)に挿入し、直径1.6mmに細線化した後、撚りピッチ長5mmおよび3mmとなるように二次撚り加工を行った。得られた多芯ロッドを厚さ0.25mm程度のテープ形状に圧延成型した後、 $840^\circ\text{C}$ で180時間の大気中熱処理(80時間熱処理-中間圧延-100時間熱処理)を経て完成試料を得た。

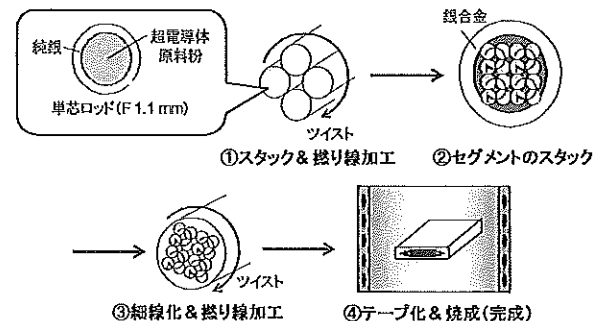


図2 多重撚り銀シース線材の作製工程フロー

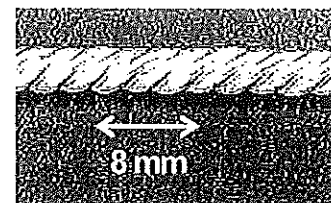


図3 一次撚り後のセグメントの外観

得られた試料線材の臨界電流 $I_c$ は、ゼロ外部磁界下において直流四端子法により測定された電流-電圧特性に対し、 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ の電界基準を適用して決定した。臨界電流密度 $J_c$ は、測定された $I_c$ 値を線材横断面における超電導芯の全断面積で除すことで算出した。更に、電流通電時の試料線材内への自己磁界侵入挙動を定性的に評価するため、 $I_c$ に対して25%および50%の直流電流を通電した時に発生する自己磁界(線材幅広面に垂直な磁界成分)の線材幅広面上分布をホール素子走査により測定した。

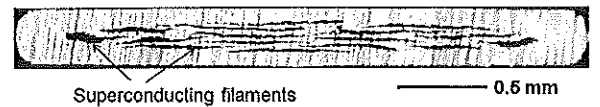
2. 研究の内容（続き）（書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。）

交流特性については、①ゼロ通電電流下で線材幅広面に平行な交流横磁界を印加した時の磁化損失  $Q_m$  は交流誘導法（ピックアップコイル法）にて、②ゼロ外部磁界下で交流電流を通電した時の通電損失  $Q_t$  は交流四端子法にて、各々評価した。以上の測定は、全て液体窒素温度下（77K）にて実施した。

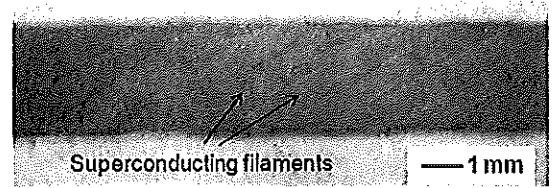
2. 2. 結果・考察

光学顕微鏡による多重撚り線材の横方向断面、および最外層の銀シースをエッチングにより除去した後の線材幅広面写真を図4に示す。完成試料の断面寸法は幅3.3mm、厚さ0.25mmであり、線材横断面全体に占める超電導フィラメント部分の占有率は、二次撚りピッチ長によらず12%程度であった。なお、作製した線材では、セグメントの撚りピッチ長は8mmであり、それを束ねた後に細線化および圧延による加工成型を行っている（図2の工程②③）。これらの工程を経た後の試料長の伸びは、スタック時と比較して30倍程度であった。したがって、完成試料中の個々の超電導フィラメントは、セグメント内で200mm以上と非常に緩いピッチ長で撚られていると推測される。結果として、線材幅広面の外観（図4(b)）は、通常の一重撚り線材の場合と大きな差異は見られなかった。

図5には、作製試料の中心200mm長区間を対象として測定した臨界電流  $I_c$ （77K，ゼロ外部磁界下）の長手方向分布を示す。測定は10mm間隔毎に実施している。図より、2度目の撚りピッチ長が5mmおよび3mmと異なる線材いずれにおいても、測定区間内の  $I_c$  は36~39A程度でほぼ均一に分布していることが確認できる（図5(a)(b)）。二次撚りを施していない試料の  $I_c$  は39~42A程度であり（図5(c)）、二次撚りに伴う  $I_c$  低下は一割程度に収まっている。臨界電流密度  $J_c$ （= $I_c$ /線材横断面内の超電導フィラメント断面積）に換算すると、2種類の多重撚り線材については25~27kA/cm<sup>2</sup>程度の特徴が測定区間全域で得られている。本特性は、住友電工により開発・市販されている交流用線材（DI-BSCCO® Type AC，一重撚り構造）の通電特性（ $J_c$ =40~50kA/cm<sup>2</sup>）と比較すると低いものの、我々の研究室において定常的に作製している撚りを施していない線材の特性と概ね同等のレベルである。今後、更なる高  $I_c$  化を図るためには、 $J_c$  向上に関する検討と合わせて、使用する銀パイプの寸法調整により、線材内の超電導芯の占有率を増加させる必要がある。

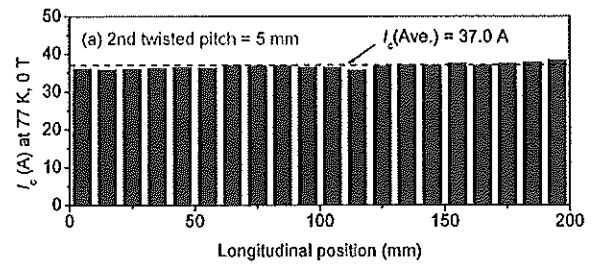


(a) 横断面写真

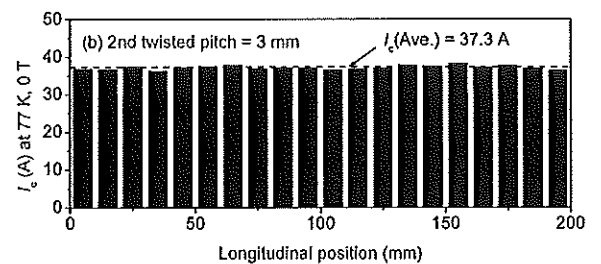


(b) 幅広面写真

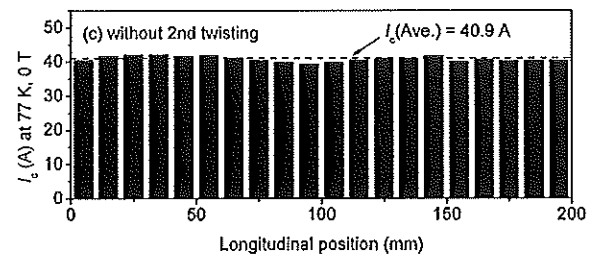
図4 多重撚り線材（二次撚りピッチ長3mm）の光学顕微鏡像



(a) 二次撚りピッチ長5mm



(b) 二次撚りピッチ長3mm



(c) 一次撚りのみ

図5 多重撚り線材の臨界電流  $I_c$  測定結果

2. 研究の内容（続き）（書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。）

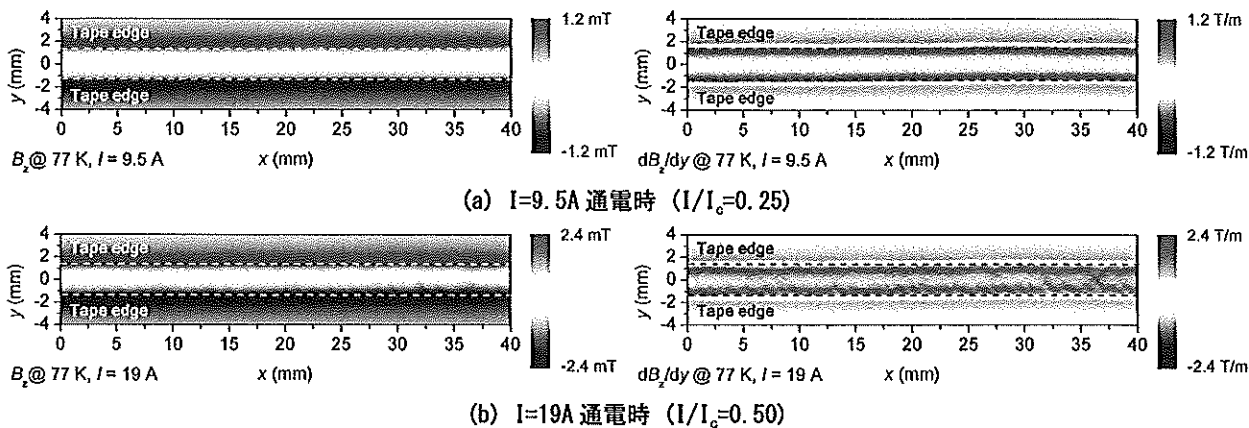


図6 多重撚り線材（二次撚りピッチ長3mm）の自己磁界  $B_z$ （左）およびその幅方向差分  $dB_z/dy$ （右）の二次元分布（測定区間  $I_c=38\text{A}$ 、破線は線材位置に対応）

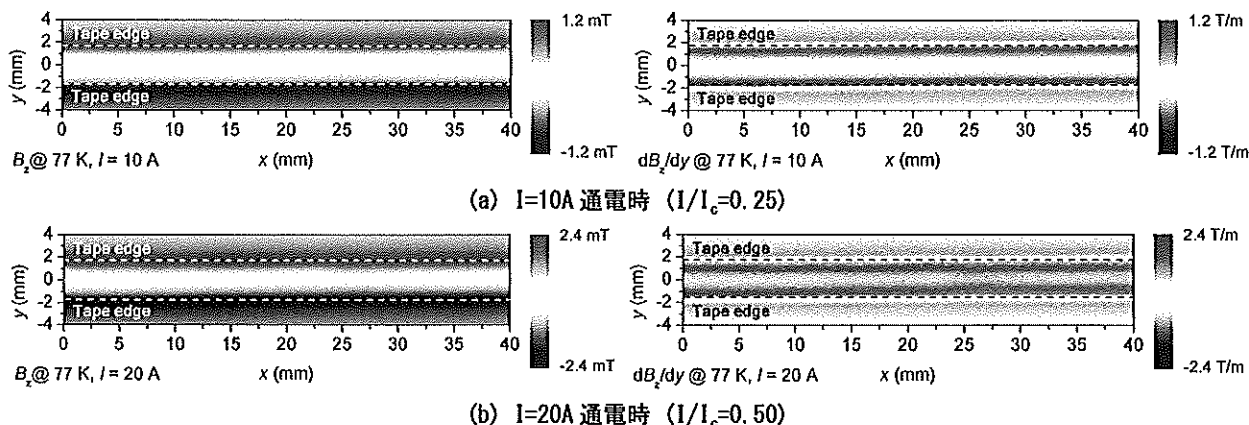


図7 撚りを施していない多芯線材の自己磁界  $B_z$ （左）およびその幅方向差分  $dB_z/dy$ （右）の二次元分布（測定区間  $I_c=40\text{A}$ 、破線は線材位置に対応）

図6には、多重撚り線材（二次撚りピッチ長3mm、 $I_c=37\text{A}$ ）に対し、ホール素子走査により測定した  $I_c$  の25%および50%の直流電流を通電した時の、線材幅広面に垂直な自己磁界  $B_z$  およびその線材幅方向差分  $dB_z/dy$  の2次元面分布（線材幅広面に垂直な磁界成分）を示す。比較のために、撚りを施していない多芯線材（19芯、 $I_c=40\text{A}$ ）の測定結果を図7に示す。各図中において線材位置は破線で示しており、 $x$  および  $y$  方向は線材長手および幅方向に各々対応している。なお、磁界測定時の線材表面～ホール素子間距離（リフトオフ）は0.5mmである。図から明らかなように、幅方向位置  $y$  を固定した場合、撚りを施していない線材では  $B_z$  は線材長手方向においてほぼ均一な分布を示すのに対し、多重撚り線材の  $B_z$  は線材長手方向において変動している。これは、線材横断面での個々の超電導フィラメントの位置が、撚りを施したことにより周期的に変化するためと考えられる。一方、 $dB_z/dy$  分布を比較した場合、撚りの有無に伴う線材長手方向での  $dB_z/dy$  の強度変動の有無という違いはあるが、線材幅方向での  $dB_z/dy$  強度の高い領域は、撚りの有無によらず線材端部近傍に局在していることが分かる。更に、通電電流の増加と共に、 $dB_z/dy$  強度の高い領域は線材端部から中心に向かって進展することも確認できる。線材面上の任意観測点  $(x, y)$  での  $dB_z/dy$  強度は、その直下位置を流れる局所電流（線材長手方向成分）の大小を強く反映する。また超電導理論（臨界状態モデル）によれば、超電導体内で取り得る電流密度の大きさは、磁界侵入領域では  $J_c$  に等しく、磁界非侵入領域では0である。このため、電流輸送に寄与しているのは、 $dB_z/dy$  強度が高い領域に位置するフィラメント群と解釈できる。撚りの有無によらず高  $dB_z/dy$  領域が線材端部近傍に局在するという結果は、多重撚り線材においても、撚りのない線材と同様に、電流通電時の外層フィラメントへの電流偏流が生じていることを示唆している。

2. 研究の内容(続き) (書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

図8には、ゼロ通電電流下で線材幅広面に平行な交流横磁界(線材長手方向に直交かつ線材幅広面に平行な磁界)を印加した時の多重撚り線材の磁化損失測定結果(77K, 50Hz)を示す。図中には、フィラメント同士が電磁氣的に強く結合し、外部磁界下において単芯的に振る舞うと仮定した場合(以後、結合モデルと呼ぶ)の磁化損失の予測値をプロットしている。撚りを施していない線材の磁化損失は、結合モデルによる損失解析値と良い一致を示すことが知られており、本解析値は磁化損失の定量的評価の際の一つの指標となるものである。なお、測定に使用した2種類の多重撚り線材(二次撚りピッチ長5mmおよび3mm)の通電特性はほぼ等しい( $I_0=37\sim 38A$ )ので、比較対象とする結合モデルの解析値は、 $I_0=37.5A$ と固定して算出している。図から明らかなように、5mT以上の磁界振幅下において、測定された損失値は結合モデルよりも低い値を示している。また、二次撚りピッチ長を減少させると共に、損失低減効果はより顕著に表れていることが確認できる。この傾向は、既に数多くの研究報告例がある一重撚り構造を有する銀シース線材の損失低減(平行横磁界下)と同様であり、多重撚り線材においても、二次撚りピッチ長を適切に制御することで、フィラメント間の電磁氣的な結合が抑制され、平行横磁界下での磁化損失低減が実現できることを示している。一方、3mT以下では、測定値の方が結合モデルよりも大きな値となる。フィラメント間結合が分断されている場合、外部磁界下での超電導領域内への磁界侵入は個々のフィラメントに対して独立的に生じる。一方、フィラメント同士が電磁氣的に結合し、あたかも一つの超電導体のように振る舞う場合、磁界侵入はフィラメント占有領域全体に対して生じる。中心到達磁界(超電導体の全域に磁界を侵入させるために必要な最小磁界値)より印加磁界が十分小さい場合には、個々のフィラメントに対して磁界侵入が生じる場合の方が、より多くの領域で磁界侵入が生じる。結果として、低磁界域においてはフィラメント群が一体として振る舞う場合よりも大きな損失が発生する。

最後に、ゼロ外部磁界下で交流電流を通電した時の多重撚り線材の通電損失測定結果(77K, 50Hz)を図9に示す。図中の実線は、試料線材と同一 $I_0$ を有する楕円断面型超電導体の通電損失解析値である。これまでの研究により、非ツイスト多芯線材、一般的な一重撚りを施した多芯線材の通電損失は、フィラメント数やツイスト長によらず本解析値に近い値を示すことが知られており、通電損失の定量的評価の際の一つの指標となるものである。図6に示される自己磁界分布の測定結果から推測される通り、本研究で作製した多重撚り線材においては、残念ながら外層に位置するフィラメントへの電流偏流は殆ど抑制されておらず、結果として通電損失の大幅な低減効果を得ることはできていない。通電時の外層フィラメントの電流偏流が抑制できなかった原因の一つとして、試作線材のセグメント内の超電導芯の撚りピッチ長が大きすぎることが挙げられる。今後の課題として、セグメントを構成するロッドを更に細線化し、一次撚りピッチ長を低減することにより、セグメント内の超電導芯の撚りピッチ長を大幅に狭小化した上で、通電時の線材内の輸送電流分布を詳細に検討する必要がある。

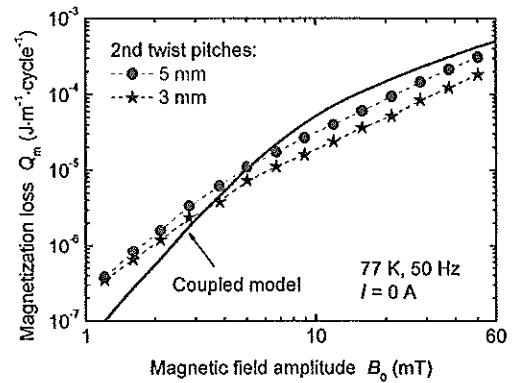


図8 多重撚り線材の磁化損失測定結果 (77K, 50Hz, 通電電流ゼロ)

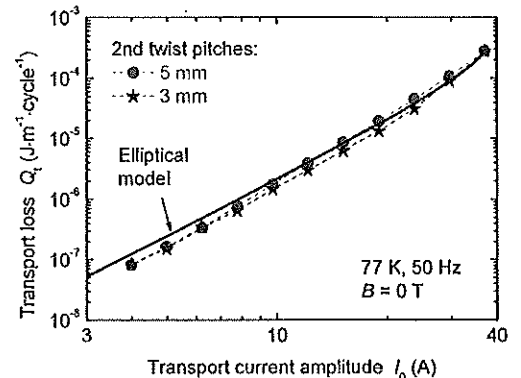


図9 多重撚り線材の通電損失測定結果 (77K, 50Hz, 外部磁界ゼロ)

### 3. 研究の結論、今後の課題

本研究では、各超電導フィラメントのインダクタンスを均一化し輸送電流の偏流を抑制するために、多芯化する前に複数のフィラメントを束ねて撚り、このフィラメント束（セグメント）を更に複数束ねて細線化した後で再度撚りを施して全てのフィラメントに転位を加えた、多重撚り銀シース線材の作製を試み、その電磁気的特性を多面的に評価した。セグメントを構成する個々のフィラメントの撚りピッチ長は、セグメント作製時には8mmとしたが、その後の細線化、圧延によるテープ化を経た試料では200mm以上に伸長していると見積もられた。結果として、銀シース部分を除去して、線材構造を観察した結果、通常の一重撚り線材との大きな差異は見られなかった。直流通電特性を評価した結果、二次撚り長を3mmまで狭小化した試料においても、 $J_c=25\text{--}27\text{kA/cm}^2$  (77K, 外部磁界ゼロ下) と良好な特性が得られていることを確認した。しかしながら、臨界電流  $I_c$  以下の電流を通電した時の自己磁界分布の測定結果から、線材内への通電自己磁界の侵入挙動は、一般的な撚りを施していない線材と同様であり、多重撚り線材においても、電流は線材横断面内において外層に位置するフィラメントに集中して流れ、電流増加と共に電流輸送域が内層のフィラメントに進展していくことが示唆された。交流平行横磁界下（通電電流ゼロ）での多重撚り線材の磁化損失は、従来の一重撚り線材の場合と同様な低減効果が確認されたが、実際に通電時の電流偏流現象は抑制されていないため、当初の目標としていた通電損失の低減効果は残念ながら確認することができなかった。今後の課題として、セグメントを構成する単芯ロッドを更に細線化し一次撚りピッチ長を低減すること、ある程度細線化を行った時点でセグメントを束ねて細線化・テープ化を行うことで、セグメント内でのフィラメントの一次撚り長を狭小化した線材作製を行い、通電時の線材内の輸送電流分布および損失特性を解析する必要がある。

#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

##### 4. 1. 社会的価値

情報化社会の急速な発展に伴う大都市部での電力需要の集中的な増大, CO<sub>2</sub> 排出量の急増に伴う地球温暖化の深刻化, 新興諸国の急激な経済発展に伴うエネルギー需要の急増など, 地球規模で出現したトリレンマ状況の克服が, 人間社会の継続的発展と自然環境の存続に向けて解決すべき深刻な問題となっている。この問題の解決に向けた対策の一つとして, 高温超電導送電ケーブルを用いた大容量・省エネルギー電力輸送に関する技術開発は急務の課題である一方で, 交流電流輸送時の導体損失の大幅な低減化が実用化に向けて大きな障害となっている。本研究は, 多重撚りという新しい線材構造を導入することで高温超電導ケーブルの実用化に直結する導体を構成する素線レベルでの交流損失の大幅低減化を目指すものである。現状は, 線材構造(特に一次撚り長)制御が不十分であり, 目標とする磁化損失と通電損失の同時低減は実証できていないが, 今後の継続的な研究実施により目標達成を目指したいと考えている。得られる成果は, 他研究グループのケーブル開発研究と互いに補完するところが極めて大きく, 低損失ケーブルを実現するための要素技術の一つとして重要な知見を提供するものと期待できる。

##### 4. 2. 学術的価値

銀シース線材に多重撚り線構造を導入し, 全超電導フィラメントに転位を施しフィラメント間のインダクタンスを均一化することで, 通電損失と磁化損失両者の低減化を目指す研究は皆無に等しく, 極めて新規性・独創性が高いと言える。また, 銀シース線材では被覆金属導体(銀および銀合金)と酸化物超電導体との複合構造を有するため, 超電導体自身が発生する損失(ヒステリシス損失)の他に被覆導体内で発生する損失(結合損失および渦電流損失)が同時に発生する。このため, ケーブル内で線材がさらされる電磁界を考慮して多重撚り銀シース線材の損失の定量的な評価を行い, 損失発生機構を明らかにすることは, 学術的に極めて重要である。現状では, 線材構造(特に一次撚り長)制御が不十分であり, 目標とする磁化損失と通電損失の同時低減は実証できていないが, 磁化損失については, 従来の一重撚り線材と同様な機構で損失低減効果が得られることを確認している。今後, 通電損失低減化に向けた多重撚り線材の構造最適化に関する検討に注力し, 通電損失発生メカニズムの解明と低減化に向けた線材構造設計指針を明確にすることができれば, 本研究の学術的価値および工学的意義は大きく高まるものと考えている。

##### 4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

- (1) R. Inada, T. Makiyara, Y. Araki, S. Baba, Y. Nakamura, A. Oota, S. Sakamoto, C. S. Li, P. X. Zhang, Non-destructive evaluation of longitudinal uniformity for twisted Bi2223 tapes using scanning Hall-probe microscopy, *Physica C* 470 (2010) 1392-1396.
- (2) T. Makiyara, R. Inada, A. Oota, S. Sakamoto, C. S. Li, P. X. Zhang, Evaluation of self-field distributions for Bi2223 tapes with oxide barriers carrying DC transport current, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21 (2011) 2820-2823.