

## 高温超伝導線材の微細構造電磁現象を基礎とした交流電気機器への応用要素技術の体系化

Systemization of elementary technology for high temperature superconductor AC applications based on electro-magnetics of fine structures of conductors

塚本 修巳 (TSUKAMOTO OSAMI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授



### 研究の概要

交流損失を現状より 1 桁低減できれば高温超伝導の応用分野が大きく広がる。本研究は超伝導の微細構造における電磁現象の研究に基づき、線材、集合導体、巻線の各構造を互いに関連付けて統合的に交流損失の大幅低減を図る手法を研究し、高温超伝導を交流電気機器に応用するための要素技術を体系化することを目的としている。

研究分野／科研費の分科・細目／キーワード

工学／電気電子工学・電力工学・電気機器工学／高温超伝導、交流損失、集合導体、巻線、Bi 系線材、Y 線材、損失低減

### 1. 研究開始当初の背景・動機

1) HTS の交流機器応用が可能になれば、直流応用より応用範囲がはるかに広がる。しかし、本格的な交流応用機器の実用化には、交流損失を当時のレベルより一桁減らす事が求められていた。

2) これは当時の技術の連なる延長では困難で、我々は新しいアプローチが必要であると考え、超伝導体・線材の電磁現象に視点を置いた研究により課題を解決することを計画した。

### 2. 研究の目的

本研究は交流損失を一桁低減する手法を研究し高温超伝導を交流電気機器に応用するための要素技術を体系化し、高温超伝導応用交流電気機器の早期実用化の基礎を与えることを目的としている。このために下記の研究を行う。

(1) 機器における磁気環境下での交流損失の評価法を確立する。

(2) 機器における電磁環境下での交流損失の大幅な低減手法を明らかにする。

(3) ロバストかつ高い超伝導性能を発揮する巻線構成手法を明らかにする。

### 3. 研究の方法

1) HTS 線材の交流損失測定法の確立。

2) 各種線材の損失データの収集と線材の電磁現象・交流損失解析モデルの構築。

3) 解析モデルに基づく交流損失の大幅な低減法の提案とその効果の検証。

4) 集合導体、巻線の交流損失測定法の開発と損失評価、解析モデルの構築、低交流損失を実現する構成方法の提案と検証。

4) Y 系導体巻線のクエンチ保護法の明確化  
5) 購入した主な設備装置

・無冷媒型超伝導マグネット (H14, @9,767 千円) : 熱量法による交流損失測定用

・ナノボルト電圧計 (H14, 15, @1,521 千円×2) : 熱電対電圧測定用

・大容量直流電源 (H15, 16, @2,079 千円×2) : 臨界電流評価用

その他、解析用クラスターサーバ、インサートデューワー、伝導冷却装置用コンプレッサ等。

### 4. 研究の主な成果

#### (1) 線材全交流損失測定法

固定ピックアップコイルによる磁化損失測定とスパイラル電圧リードによる 4 端子法による通電損失測定を組み合わせ、両者の和を取って全損失のデータを取得する方法を開発した。熱的方法と本電気的方法を用い、同じ箇所を同時に測定することにより、本方法の妥当性検証を行った。

#### (2) 擬似ツイスト導体による磁化損失低減

斜に YBCO 層を分割した 2 枚のテープ線材を張り合わせ実質的に撚りの効果を得る方法、擬似ツイスト導体を提案した (図 1)。これにより、分割数を増やすことにより交流損失を 1 桁以上減らすことが可能であることが示された。

#### (3) 集合導体の損失測定法開発と測定

我々の開発した図 2(a) に示す測定法により、非磁性基板 Y 系線材 (幅 1cm) を 3 本平面に並べた状態での通電損失を計測した (図 2(b))。中央線材の 3 本並列通電時の損失  $q_{2s}^0$  [J/m/cycle/ $I_c^2$ ] は単独通電時の

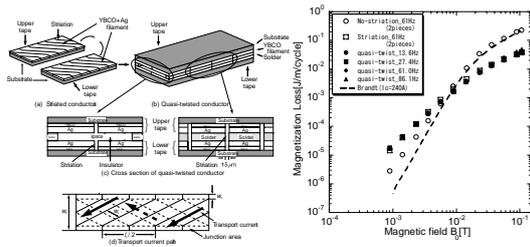


図1 擬似ツイスト導体

損失  $q_2 I$  の値の1桁程度小さくなっている。これにより、線材の並べ方により隣接線材の作る磁界により損失が大幅に減少することが示された。

(4) 巻線の交流損失低減最適構造

高温超伝導テープ線材の損失データより交流損失を近似的に解析する手法を開発した。Bi系線材を用いたパンケキ積層コイルの交流損失を評価し、モデルの妥当性の検討、および巻線の断面形状の最適設計方法を示した。

(5) Y系線材のクエンチ保護

Y系線材を用いたコイルのクエンチ保護のための導体の安定化設計法が明らかにした。

以上により、高温超伝導を交流電気機器に応用するための要素技術を体系化するという目的はほぼ達成できた。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

(1) 5年間にわたる研究の中で高温超伝導の交流損失、電磁現象に対する理解が格段に進み、交流損失の低減に関して各種の独創的な方法が示された。

(2) 研究成果の国内外会議での積極的な発表、また、論文賞受賞(1件)、多くの招待講演(基調講演1件を含み16件)があり、さらに研究代表者が依頼を受けて米国の学術図書(2007年夏発刊予定)における交流損失の章の執筆を行った。

(3) 以上のように本研究の成果は国内的、国際的にも高く評価され、学術的にも大きなインパクトを与えたと考えられる。

(4) 本研究によって、4名が工学博士号取得、現在2名の学生が博士課程(後期)に在学、本分野での研究者の育成に貢献。

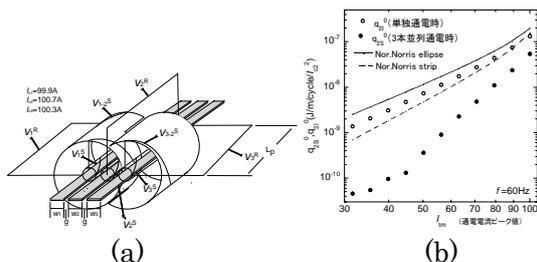


図2 YBCO 導体の3本並列時の通電損失特性

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

[最優秀論文賞]  
[1] S. Nakamura, J. Ogawa, and **O. Tsukamoto**, "AC Transport Current Losses in YBCO Tapes with Adjacent Tapes", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 52, pp. 877-884, 2006

[基調講演]  
[2] **O. Tsukamoto**, "Roads for HTS Power Applications to Go into the Real World", presented at EUCAS'03, Sep. 2003, Sorrento Italy

[招待講演]  
[3] **O. Tsukamoto** and N. Sekine, "Study on Stability and Quench Protection of High Temperature Superconduction of YBCO Conductors" (Presented at ISS'05)

[4] **O. Tsukamoto**, "Comparison of electric and calorimetric measurements of AC losses in HTS wires and bulks", *PHYSICA C* Vol. 445-448, pp. 701-706, 2006 (Presented at ISS'05)

[5] N. Amemiya, Z. Jaing, M. Nakahata, M. Yagi, S. Mukoyama and Y. Shiohara, "AC loss reduction of superconducting power transmission cables composed of YBCO coated conductors", 2006 (Presented at ASC'06)

[6] N. Amemiya, S. Kasai, K. Yoda, Z. Jiang, G.A. Levin, P.N. Barnes and C.E. Oberly, "AC loss characteristics of multifilamentary YBCO coated conductors", 2004 (Presented at ASC'04)

[学術論文]  
[7] **O. Tsukamoto**, "AC losses in type II superconductor strip with inhomogeneous critical current distribution", *Superconductor Science and Technology*, Vol. 18, No. 5, pp. 596-605, 2005

[8] N. Amemiya, S. Sato, and T. Ito, "Magnetic flux penetration into twisted multifilamentary coated superconductors subjected to ac transverse magnetic fields", *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, pp. 123907-1-123907-7, 2006

[9] S. Fukui, T. Noguchi, J. Ogawa, M. Yamaguchi, T. Sato, **O. Tsukamoto**, T. Takao, "Numerical Study on AC Loss Minimization of Multi-Layer Tri-Axial HTS Cable for 3-Phase AC Power Transmission", Presented at ASC2006, To be published in *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.17, 2007.

ホームページ等

<http://www.rain.dnj.ynu.ac.jp/KibanS/top.html>