

## 大型超電導コイル用超電導導体の電流分布一様に関する研究

研究代表者 工学部 浜島 高太郎

## 研究の目的

超電導ケーブルは、電力応用分野において、従来の銅ケーブルに比べ、非常に小型で低損失であるため、実用化に向けた開発が世界各国で精力的に行われている。しかし、多層電力ケーブルでは、各層のピッチ長が等しい場合に、電流分布が不均一となる。これにより、ケーブル容量が低減し、大きな交流損失の原因となる。

本研究では、上記研究課題を解決するために、理論の構築とそれを実証する試作実験を主体として研究する。すなわち、①超電導導体の電流分布を磁束の保存則を用いて理論的に解析し、基本式を導く、②偏流現象の発生しない超電導導体の構成条件を理論的に見つけ出す、③偏流のない新規導体を提案し、超電導線で試作する、④試作した偏流のない新規導体の基礎的な特性試験を行い、提案した理論の妥当性を証明する、⑤偏流現象の発生しない超電導導体の設計法を提案する、ことを目的とする。

本研究の成果は核融合装置用超電導コイルの超電導導体のみでなく、超電導電力ケーブルなどの次世代の電力応用機器に用いられる超電導導体にも適用できる。

また、本研究成果は磁界の加わる一般的な環境で使用する次世代の超電導導体など、広範囲な超電導導体へ一般化して適用できる。

## 研究成果

## 1 高温超電導導体の設計

一様な電流分布を実現するため、筆者らが提案した理論計算に基づいて、図1に示すBi2223の高温超電導テープ線を用いた全長1 mの同軸3層撚り超電導ケーブルを設計した。理論計算は、隣接した層にある未飽和の任意の2本の素線内フィラメントの電気的中性線で囲まれた磁束はゼロであるという保存則に基づいたものである。同軸多層撚り導体の各層の電流分布は、自己磁界のみを考慮した次の方程式で得られる。

$$\frac{(r_{k+1} - r_k)}{\pi(r_{k+1} - r_k)} \sum_{i=1}^k I_i + \left( \frac{\varepsilon_k}{L_k} - \frac{\varepsilon_{k+1}}{L_{k+1}} \right) \sum_{i=1}^k \pi r_i^2 \left( \frac{\varepsilon_i I_i}{L_i} \right) + \left( \frac{\varepsilon_k}{L_k} \pi r_k^2 - \frac{\varepsilon_{k+1}}{L_{k+1}} \pi r_{k+1}^2 \right) \sum_{i=k+1}^n \left( \frac{\varepsilon_i I_i}{L_i} \right) = 0 \quad (1)$$

ここで、 $i$ ,  $k$ は内側から数えた層数で、 $L_i$ は第 $i$ 層のツイストピッチ長、 $r_i$ はケーブルの中心から第 $i$ 層の銀シース線の中心までの半径、 $n$ は全層数を、 $I_i$ は第 $i$ 層を流れる電流、 $\varepsilon_i$ は第 $i$ 層の撚り方向を示す係数でS撚りの場合は+1、Z撚りの場合は-1である。式(1)は、各層の電流分布が、各層のピッチ長、撚り方向、およびケーブルの中心からの半径の3つの導体構成パラメータで制御できることを示しているまた、ケーブルの全輸送電流 $I_t$ は次式で与えられる。

$$I_t = \sum_{i=1}^n I_i \quad (2)$$

各層のピッチ長は、式(1)、(2)の各層の電流が一様であるとし、数値解析により求める。第1層目、2層目、3層目の半径が11.21 mm、16.21 mm、21.21 mmである同軸3層撚り導体（同方向撚り）における一様な電流分布を実現する各層のピッチの関係を図2に示す。これより、一様な電流分布を得るには、外層ほどピッチを短くする必要がある。

## 2 導体の製作

巻き線は、両面テープでカプトンシートに酸化生物超電導線材（Bi2223）を平行に張り付け、丈夫なシート状にして製作し、そのシートを、外径が

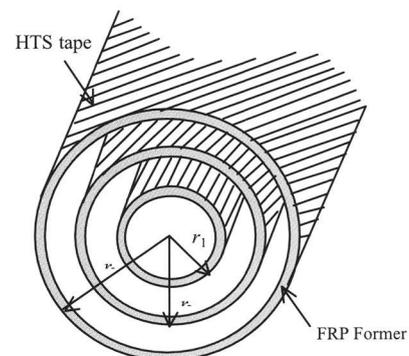


図1 3層同軸超電導導体の概念図

それぞれFRP (Fibler Reinforced Plastic, 厚さ1mm)の巻き枠に螺旋状に巻き付けた。1層目は巻き枠にそのまま巻き付けたが、製作しやすいように2層目、3層目については、FRPを縦に切断し2つに分け、内側の層を取り囲む様に再び元の形状に固定し、巻き付けた。この行程において、巻き枠の半径の変化を防ぐために、小型の固定材を巻き枠の中に挿入し、作業を行った。そして、3層ともピッチの撚り方向は同じ方向である。これを各層ごとに端部の銅ブロックに半田で固定した。また、各層に電流測定のために、良い線形性を示すログスキーコイルを設置した。そして、完成した同軸3層撚りケーブルの写真を図3に、また、表1には主要な導体諸元を示す。

### 3 測定及び測定結果

図4に交流電流を通電したときの測定回路の概略図を示す。測定は、液体窒素で導体を冷却して行った。通電電流は、シャント抵抗を用いて測定した。超電導体とリターン電流のリード線は磁氣的干渉を防ぐ為、十分距離をとった。0A~100A(周波数100Hz)の交流電流 $I_1$ を通電し、シャント抵抗とログスキーコイルの出力をデジタルスコープにより測定した。

### 4 結果及び検討

図5に2層導体における全通電電流に対する各層の電流分布測定結果を示す。理論上、2層の場合の各層の電流分布は3:7となり、測定結果は理論通りの電流比となることが実証された。

表1 高温超電導ケーブルの主要諸元

Ag-sheathed Bi-2223 tape			
Width	3.20mm		
Thickness	0.21mm		
Critical current	15A		
Multilayer Conductor			
	Layer 1	Layer2	Layer 3
Total length [mm]	956.0	978.0	1000.0
Radius [mm]	11.21	16.21	21.21
(including Kapton sheet and adhesive tape)			
Twist pitch [mm]	333.33	166.67	111.11
Number of tapes	20	26	25
Bending strain [%]	0.06	0.11	0.12

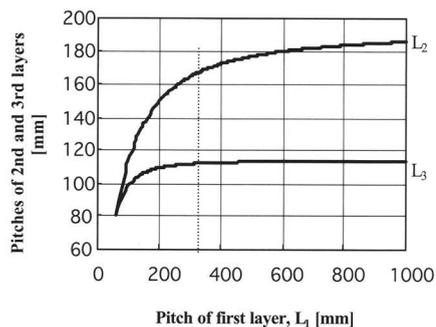


図2 一様電流分布を達成する第1層の撚りピッチに対する第2,3層の撚りピッチの関係

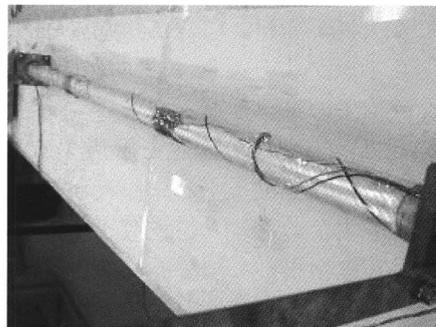


図3 完成した3層同軸超電導導体

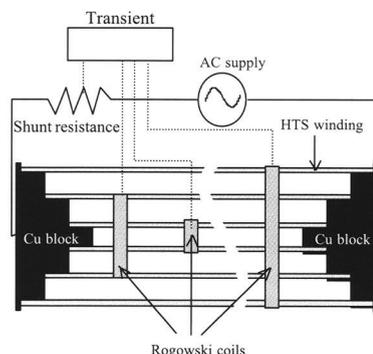


図4 試験回路の概念図

図6には3層導体における全通電電流に対する各層の電流分布測定結果を示す。測定結果より、各層の電流分布の割合は30.25%, 36.82%, 32.94%となり、理論値と測定値を同図に示す。2層導体の場合と同様に、ほぼ理論値通りの結果が得られた。

### 5 結論

隣接した層間の磁束保存則の関係式より得られた電流分布を、同軸多層撚り導体において、実験により実証することができた。また、Bi2223の銀シースにおいて、最大曲げ歪み率(0.2%)以下では、可変ピッチによって電流分布制御が可能であることが分かった。そして、理論値を実証するために、同軸3層撚り導体を製作し、測定を行った。

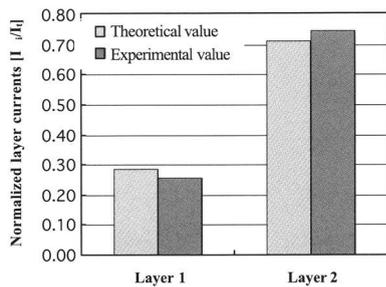


図5 2層における電流分布理論結果と測定結果

各層の電流分布を均一とするためのピッチ長の影響を強めるため、端部には接触抵抗が非常に小さな値となる階層状の銅ブロックを使用した。2層導体においては、理論計算通りの不均一な電流分布測定結果が得られた。2層導体では、電流分布は不均一となるが、3層目を製作し、3層導体として測定を行うと、1層目、2層目、3層目における電流分布の割合はそれぞれ30.25%、36.82%、32.94%となった。これは、理論値と非常に近い結果であり、同軸多層撚り導体において、各層のピッチ長を調節する事により、各層の電流分布を均一化できる事を示唆している。

これらのことから、同軸多層撚り導体の電流分布解析の妥当性は実験で検証できた。すなわち、導体構成パラメータ（ピッチ、半径、巻き方向）を制御することにより、導体内の電流分布を制御できることを実証した。

## 産業技術への貢献

同軸多層撚り超電導導体の均一電流分布を得るための理論を新しく提案し、その実証試験を実施して、理論の妥当性を確立した。これにより、超電導ケーブルの基本設計が可能となった。したがって、磁界を導体に印加したときの特性を調べることにより、超電導ケーブルに関する基本的な特性を得ることができるようになる。

事業化に関しては、本年度の成果をもとに、更なる応用を検討し、電線、電機メーカー、電力会社、国立研究所などへの働きかけを行い、共同研究、あるいは委託研究をしつつ、技術移管をする。また、本開発研究成果の電流偏流のない超電導導体を実際の超電導マグネット装置の導体候補として、あるいは、装置も含めた提案を国家プロジェクトなどへの提案が期待できる。

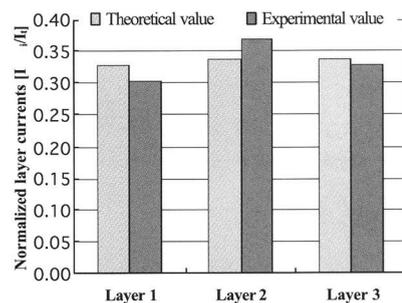


図6 3層同軸超伝導導体の電流分布解析値と測定結果

## 研究発表

- 1) 浜島高太郎, A. K. M. Alamgir, 原田直幸, 津田理, 小野通隆, 高野広久: 超電導導体内の電流分布解析; 低温工学会誌, Vol.35, No.4, pp.176-183, 2000
- 2) A. K. M. Alamgir, 伊藤康隆, 原田直幸, 津田理, 浜島高太郎, 小野通隆, 高野広久: 同軸多層撚り超電導導体の均一電流分布に関する実験; 低温工学会誌, Vol.36, No.1, pp.10-15, 2001
- 3) 津田理, A.K.M.Alamgir, 伊藤康隆, 原田直幸, 浜島高太郎, 高野広久, 小野通隆: 撚り乱れを考慮した同軸多層撚り導体の均流化に関する考察; 電気学会研究会資料, ASC-00-47, RM-00-43, pp.49-54, 2000.6
- 4) 伊藤康隆, A.K.M.Alamgir, 津田理, 原田直幸, 浜島高太郎: 同軸多層撚り導体における電流一様化実験; p521, 平成12年度電気・情報関連学会中国支部連合大会 (平成12年10月21日, 岡山大学)
- 5) 浜島高太郎, A.K.M.Alamgir, 伊藤康隆, 津田理, 原田直幸, 小野通隆, 高野広久: 高温超電導ケーブルの電流一様化解析; 第63回秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p247, 2000
- 6) 津田理, A.K.M.Alamgir, 伊藤康隆, 原田直幸, 浜島高太郎, 小野通隆, 高野広久: 高温超電導ケーブルの電流一様化実験; 第63回秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p248, 2000
- 7) A.K.M.Alamgir, Y.Itoh, M.Tsuda, N.Harada, T.Hamajima, M.Ono and H.Takano; Homogeneous current distribution experiment of a multilayer coaxial Superconductor; The international Workshop on Critical Currents and Applications of HTS, pp.56-57, Oct. 17-19, 2000 (Fukuoka, Japan)

## グループメンバー

氏名	所属	職 (学年)
浜島 高太郎	工・電気電子	教授
原田 直幸	工・電気電子	講師
津田 理	工・電気電子	助手
アラムギル	工・電気電子	D2
伊藤 康隆	工・電気電子	M1

## 連絡先

電話 0836-85-9475 (ダイヤルイン)

FAX 0836-85-9401 (学科事務室)

E-mail: hamajima@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp