

(109)超電導工学

# コイルの時定数の計測による超伝導線材の接続抵抗の評価方法の検討

## Investigation of evaluating joint resistance of superconducting tape by measuring coil time constant

寒川 太郎                      大西 敬介                      原田 直幸  
Taro Samukawa              Keisuke Onishi              Naoyuki Harada  
山口大学大学院 創成科学研究科

### 1. はじめに

酸化物超伝導テープ線材は、液体窒素や冷凍機で冷却する超伝導コイルに用いられており、応用機器の開発が進められている。また、永久電流モードで運転する超伝導コイルにおける超伝導テープ線材同士の接続は、超伝導線材の応用において必要不可欠な技術である。永久電流モードで運用する超伝導コイルにおいて、例えば、100 A 程度の電流を流した時に接続抵抗で発生する電圧は  $\mu\text{V}$  以下となり、一般的に用いられる四端子法による抵抗測定では、正確な測定が困難である。そこで、本研究では、接続部を含むコイルに発生する磁場の時間変化を、ホール素子を用いて測定し、コイルに流れる電流の時間変化やコイルの時定数を求め、接続抵抗を評価する方法について検討を行った。

### 2. 超伝導コイル用いた実験方法

本実験では、銀シース Bi-2223 超伝導テープ線材を用いた。その仕様を表 1 に示す。はんだを用いて、上記の超伝導線材を接続し、図 1(a), (b)に示す超伝導コイルを作製し、その仕様を表 2 に示す。

表 1 Bi-2223 超伝導テープ線材の仕様

|       |         |
|-------|---------|
| 超伝導材料 | Bi-2223 |
| 幅     | 4.2 mm  |
| 厚さ    | 0.22 mm |
| 臨界電流  | 約 90 A  |



(a) コイル 1                      (b) コイル 2  
図 1 作製した超伝導コイル

このコイルの接続部は 40 mm とし、はんだにより接続した。このコイルで発生する接続抵抗は、超伝導テープ線材の銀シースと接続に使用したはんだによるものとなる。この時、コイル 2 は 1 回巻のコイルを 2 段にしたものとなっている。

表 2 超伝導コイルの仕様

|          | コイル 1 | コイル 2 |
|----------|-------|-------|
| コイルの数    | 1     | 2     |
| 内半径 (mm) | 40.1  | 41.0  |
| 幅 (mm)   | 4.2   | 9.5   |
| 厚さ (mm)  | 0.22  | 0.22  |

図 1(a), (b)に示したコイルとホール素子を図 2 に示すように配置した。ここで使用するホール素子は、GaAs を用いた AKM 製の HG-372A を用いた。液体窒素に浸して冷却し、コイルにネオジウム系永久磁石を近づけ、その後、離すことで電磁誘導によりコイルに電流を流し、この電流によりコイルに発生した磁場の変化をコイルの下に設置したホール素子で測定した。この時、ホール素子は、乾電池を用いた定電圧駆動とし、ホール素子の出力電圧は、パソコンに接続したデジタルマルチメータを用いて測定した。

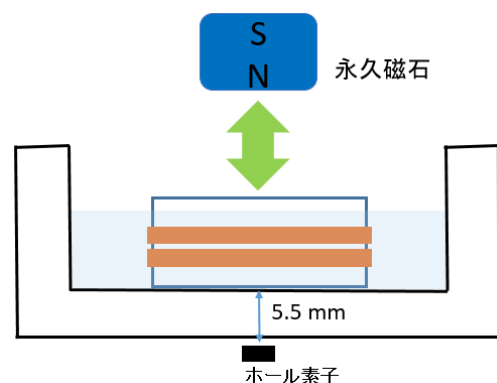


図 2 接続部の評価方法の模式図

次に、測定に用いたホール素子の出力電圧と磁束密度の関係の測定方法を示す。手順としては、図 3 の特性確認用の銅コイル（巻き数：27，直径：82.1 mm，幅：38.3 mm）を作製し、図 4 に示すようにホール素子の上に設置する。銅コイルに電流を流し、磁場を発生させ、マルチメータを用いてホール素子の出力電圧  $V_H$  を計測する。計測の結果と銅コイルで発生した磁場との関係を図 5 に示す。

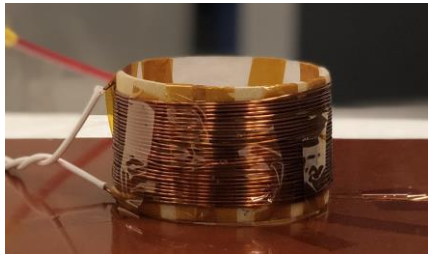


図 3 ホール素子の特性測定に用いた銅コイル

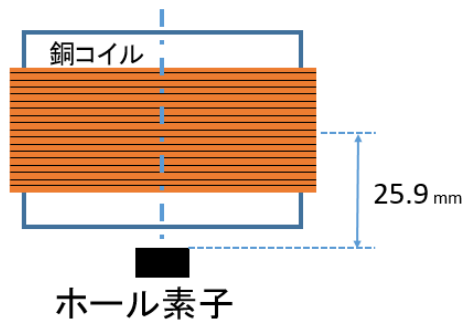


図 4 ホール素子の出力電圧と磁束密度の関係の測定の模式図

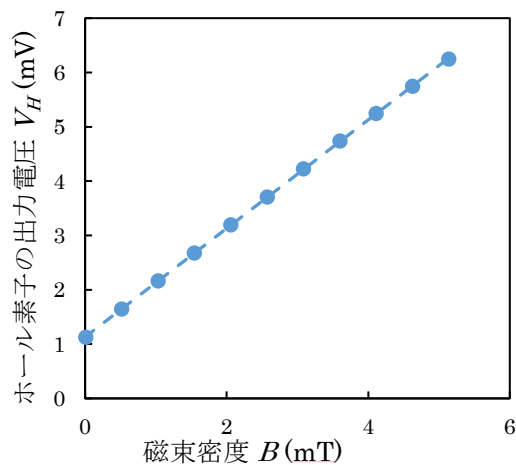


図 5 ホール素子の磁束密度と出力電圧の関係

図 5 の結果からホール素子の出力電圧  $V_H$  と磁束密度  $B$  の関係は、 $V_H = 0.99896 B + 1.1318$  と表すことができる。この結果からホール素子のオフセット

電圧  $V_{OFF}$  は、1.1318 mV であるため、以降の測定では、この値を用いて、 $B$  を求めた。さらに、コイルの時定数を求め、接続抵抗の評価を行った。

### 3. 接続部の評価結果

コイルがない場合において、永久磁石を近づけ、離れた場合のホール素子の出力電圧  $V_H$  の変化を測定し、次にコイル 1、2 において、それぞれの磁場の変化の様子を測定した。図 6 は、コイルがない場合の 32 秒において、出力電圧  $V_H$  が急激に変化する時間を基準にして、コイル 1、2 の出力電圧  $V_H$  が急激に変化する時間を合わせ、示したものである。

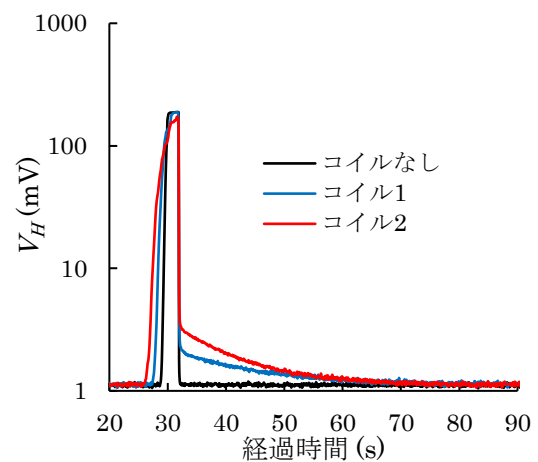


図 6 磁石の磁場とコイルの磁場の比較

次に 33 秒以降のホール素子の出力電圧  $V_H$  の値からホール素子のオフセット電圧  $V_{OFF}$  を差し引いた変化を図 7、8 にそれぞれ示す。この時、図 7、8 に測定結果を指数関数に近似したものを破線で示す。

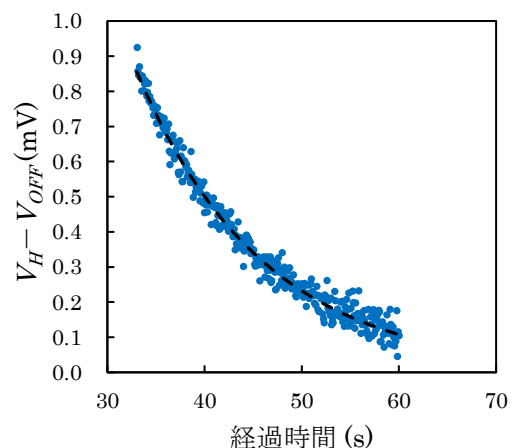


図 7 コイル 1 における  $V_H - V_{OFF}$  の時間変化

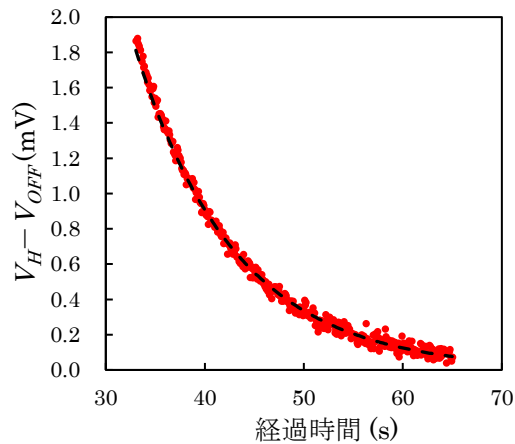


図 8 コイル 2 における  $V_H - V_{OFF}$  の時間変化

コイル 1, 2 は, 単純な RL 直列回路となるので, 時定数  $\tau$  は,  $\tau = L/R$  と表すことができ, 接続抵抗  $R$  は,  $R = L/\tau$  で求めることができる. また,  $L$  の値はコイルの形状と巻き数で決まる. ここで, コイル 1 の場合, コイルのインダクタンスは  $L_1 = 1.93 \times 10^{-7} \text{ H}$  となり, 時定数は図 6 に示した変化から 13.0 秒となり, 接続抵抗  $R$  は,  $14.8 \text{ n}\Omega$  となった. コイル 2 の場合, コイルのインダクタンスは  $L_2 = 1.57 \times 10^{-7} \text{ H}$  で時定数は図 7 に示した変化から 10.1 秒となる. ここから接続抵抗は,  $15.5 \text{ n}\Omega$  となった.

#### 4. まとめ

超伝導コイルの接続抵抗を正確に測定するために, ホール素子を用いてコイルの時定数を求め, 接続抵抗を算出する方法の検討を行った. 今回測定した抵抗値は, 線材同士の接続に使用したはんだと線材の銀シースによって発生するもので, この接続抵抗は四端子法での測定も可能な電圧であったため, 今回の測定結果と四端子法による測定結果を比較すると, それぞれの接続抵抗は近い値となった. 今後は, より小さい抵抗値となる超伝導線材の接続部の評価に用いることが可能か検討を進めていく予定である.