機械的加振を受ける超電導コイルの発熱特性

鈴木 栄司, 斉藤 実俊*, 大森 順次**, 沖 雅 雄***, 鈴木 史男****

鉄道総合技術研究所 国分寺市光町 2-8-38

* 鉄道総合技術研究所浮上式鉄道宮崎実験センター 日向市美々津町 1610-3

** 東芝重電技術研究所 横浜市鶴見区末広町 2-4

*** 三菱電機㈱ 尼崎市塚口本町 8-1-1

**** 日立製作所日立工場 日立市幸町 3-1-1

(1994 年 5 月 18 日受理)

Characteristics of Heating in a Superconducting Coil Mechanically Vibrated

Eiji SUZUKI, Sanetoshi SAITO,* Junji OHMORI,** Masao OKI*** and Fumio SUZUKI****

Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji 185

* Miyazaki Maglev Test Center, Railway Technical Research Institute,
1610-3 Mimitsu-cho, Hyuga 889-11

** Heavy Apparatus Eng. Lab., Toshiba Corp., 2-4 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230

*** Mitsubishi Electric Corp., 8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661

**** Hitachi Works, Hitachi Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi 317

(Received May 18, 1994)

Synopsis :

It is revealed that much heat is generated not only by the eddy current due to the relative displacement between the conducting elements in the magnet, but also by the mechanical vibrating deformation of a superconducting coil. We measured the characteristics of heating by the mechanically vibrating superconducting coil in resonance using the oil servo actuator. As a result of these experiments, the following facts are made clear: (1) The heat generated in a vibrating superconducting coil is larger in the twisting configuration than in the bending one under the vibrating mode. (2) The characteristics of the increment in heating in the vibrating coil under the energizing and the de-energizing state were almost the same. We cite as the factor in heating phenomena of the mechanical excitation the frictional heat between the fasteners and a superconducting coil. And the size of the displacements in these frictional parts are supposed to be the order of several micrometers. We intend to make further analysis of the factor of heating from now on.

Keywords : heating phenomena, superconducting coil, resonance, friction, mechanical vibrating deformation

1. はじめに

超電導コイルに対して機械的に曲げ変形等をさせ、その時のクエンチ限界等を見る目的で超電導コイル機械的曲げ試験装置を製作し実験を進めてきたが、純機械的加振を受けて超電導コイルが振動し、曲げや振じれの変形をする時にも無視できない熱損失を発生することがわかった。

この熱発生は、浮上式鉄道車両の超電導磁石が走行

中に地上コイルからの電磁気的外乱を受け、振動した際に生じる内部発熱現象¹⁾の要因の一つとも考えられるうえに、超電導コイルのクエンチにも結びつくので重要な意味をもっている。そこでこれらの発熱量の定量評価と発熱要因の解明について以下に報告する。

2. 試験方法

2.1 試験装置

試験装置の全体図を Fig. 1 に示す。超電導コイルそ

Fig.1 Vibrating test facility for mechanically bending (twisting) coil.

のものは、試験装置の液体ヘリウムタンク部より SUS 製ワイヤーでつり下げておく。加振機構としてはレーストラック状コイルの両端円弧部およびコイル中心部に設けたロッド受け座にフランジを介して固定された 3 本のロッドを真空容器外に取り出し、両端の 2 本のロッドは固定し、中央の一本のロッドに油圧加振装置により加振力を与える構造になっている。

したがって超電導コイルには基本的には曲げ力を与えることになるが、実際には周波数によっては他のモードの振動も誘起される。また超電導コイルの対角線上にロッド受け座となるフランジを溶接し、一方の対角線上の 2 点を加振し、他の対角線上の 2 点で反力を受けもたせる構成にした試験も実施しており、この場合は超電導コイルには基本的に振じれ力を与えること

になる。

油圧アクチュエータは、ほぼ準静的に近い低周波数から 400 Hz 程度の高周波数域までの幅広い周波数をもつ加振力を発生することができる。

本装置の特徴としては、電気的加振要因がないことのほか、超電導コイルの励磁または無励磁に関係なく試験が可能なことであり、種々実施した各試験においても励磁状態と無励磁状態両方の比較を行った⁵⁾。

2.2 試験方法

加振試験時に発生する熱負荷の増分を測定する手段としては、液体ヘリウムの入っている内槽系からの蒸発量を測定し、非加振時である静置時の蒸発量との差をもって算出することにした。

試験方法としては超電導コイルを励磁状態および無励磁状態のそれぞれにおいて次のような試験を行った。すなわち、

- (1) 加振力を一定にして、加振周波数を掃引していった時の振動加速度および蒸発量の変化を把握する。
- (2) 種々の周波数において、一定の加振力振幅で加振し続けた定常状態における熱負荷増分をみる。
- (3) 特定の周波数（共振点）において、加振力を順次増やしていった時の熱負荷増分特性およびコイルクエンチの発生の有無を確認する。

試験用超電導コイルは、現在山梨実験線用超電導磁石に採用することで検討が進められている極ピッチが 1,350 mm の短尺型（レーストラック形、中心間寸法、

Table 1 Various structure of superconducting coil.

Kind of superconducting coil	A type	B type	C type
Superconducting wire	(NbTi fine multi-filamentary wire)		
(1) Copper ratio	about 1.0	about 1.0	about 1.5
(2) Numbers of turn	1,167	1,400	1,400
(3) Magnetomotive force	700 kA	700 kA	700 kA
(4) Running current	600 A	500 A	500 A
(5) Sectional dimension of SC coil	W 40×H 72 mm	W 72×H 72 mm	W 70×H 72 mm
(6) Configuration of turning	method like laying brick	method laying in tight array	same as B type
Structure of inner vessel			
(1) Sectional shape	deformed ellipse shape (machine made)	shape of near rectangular (press made)	rectangular
(2) Thickness of main plate	about 5 mm	about 3 mm	about 3 mm

Fig. 2 Characteristics of heating in the mechanically bending test.

Fig. 3 Acceleration of 8 points on the coil in the mechanically bending test. The numbers ①~⑧ correspond the position of the accelerometers in Fig. 4.

幅 500 mm×長さ 1,070 mm) のものであり, 取り替え可能な構成となっている。

2.3 計測センサー

本機械加振時における計測としては, 次のような項目を測定した。

内槽表面の振動加速度

コイルおよび内槽表面部の歪み

コイル部の温度

コイル内槽表面の温度(銅・コンスタンタン熱電対)

Fig. 4 Configuration of vibration mode.

コイル部のサーチコイル

2.4 供試超電導コイルの基本仕様

試験に使用した超電導コイルは, 山梨実験線に採用することで検討が進められている 3 種類の短尺型コイルである。これらの超電導コイルの構造は製作メーカーにより細部が異なっているが, 基本仕様は Table 1 の通りである。

3. 試験結果

3.1 熱負荷増分特性

Fig. 2 に A 型コイルを用いて加振力を一定状態にして加振した時の液体ヘリウム蒸発量を示す。浮上式鉄道用超電導コイルの場合, 浮上コイルからの加振力が大きく, 500 km/h 走行時の周波数は 308 Hz に相当することになる。図よりわかるように蒸発量の大きなピークは 270~280 Hz 付近である。

一方, 超電導コイル内槽表面に取り付けた振動加速度計出力を示したのが Fig. 3 である。振動の大きな

Fig. 5 Structure of superconducting coil.

(a) Characteristics of A type coil actuated by bending force

(b) Characteristics of B type coil actuated by twisting force

Fig. 6 Increment of heat load versus actuating force.

ピークは2箇所あり、一つは蒸発量でもピークのあった270~280 Hz付近と、もう一つは150~160 Hz付近である。この時の振動モードをFig. 4に示す。この図より上記2つの共振点における振動モードはそれぞれ捩じれモードと曲げモードに対応していることが読み取れる。

これらの試験結果より超電導コイルが捩じられるような機械的変形を受ける際には、その摺動部において相当大きな摩擦発熱が生じていることが予想される。

この摩擦熱の発生箇所を直接目で確認することはで

Fig. 7 Increment of heat load at low frequency.

Fig. 8 Temperature on the surface of inner vessel and coil versus actuating frequency. The sensors of CRI 5, CGC 1, CGC 2 are attached on the upper side of coil.

きないが、種々の検討からFig. 5に示される超電導コイルと取り付け金具の間であると推定している。すなわち、高速走行時に電磁力により超電導コイルが共振し変形を生じるために、超電導コイルとそれを巻き回している取り付け金具との間で微視的な滑りが発生し、摩擦発熱することがあげられる。

Fig. 6はA型コイルの曲げ加振およびB型コイルの捩じれ加振において、加振力を増やしていった時の熱負荷増分特性を示している。熱負荷増分は加振力に対して比例以上の関係となっている。これは加振力を増やすと、相対滑り距離が増大するのみならず、滑り発生領域が拡大するためと推定している。

またFig. 7はB型コイルの捩じれ加振において、加振力を一定にして極低周波数における熱負荷増分の特性を示したものであり、理論上は慣性力が無視できるので、準静的変形による摩擦発熱であれば繰り返しのみ異なるので、熱負荷増分は周波数に比例すると予想していたが、実際には完全な比例関係は得られなかった。

さらにFig. 2からもわかるように、熱負荷増分特性

Fig. 9 Temperature on the surface of inner vessel and coil versus actuating force. The sensors of CR15, CGC1, CGC2 are attached on the upper side of coil.

は、超電導コイルを励磁した場合と無励磁の場合であり、あまり差がないことが読み取れる。このことは発熱がコイル表面と取り付け金具間の滑り摩擦によるとしても、フープ力にあまりよらないことにもなるが、まだその原因がはっきりしていない。

3.2 コイル表面温度の変化

超電導コイルの機械的加振時における発熱箇所を推定する意図から、超電導コイル部の各所に温度センサー（カーボンガラス抵抗温度計）を取り付け、加振中の変化をみた。

Fig. 8 はB型コイルの振じれ加振時の試験結果であり、無励磁状態（加振力 150 kgf=1.47 kN）で加振周波数掃引した時の温度変化であり、特徴として 320

Hz あたりで上辺につけた温度センサの示す温度が上昇していることがわかる。

また Fig. 9 は無励磁時に 300 Hz において加振力を増やしていった時の温度上昇を示しており、やはり上辺に関係した部分のみの温度上昇が見られる。

これらのことより、特に振じれの共振点で加振力が 100 kgf (0.98 kN) 以上の場合にコイル上辺あたりの温度上昇が見られるが、上辺部のみでの発熱というよりも、蒸発したガスが多くなって、上辺の内槽内に溜まるために温度上昇したと解釈している。曲げ変形や 100 kgf (0.98 kN) 以下の振じれ変形では蒸発量の増分はあるものの、温度上昇はあまりない。

これらのことから、局部的温度センサーの指示値から発熱部位の特定は困難と思われた。

4. 考 察

4.1 摩擦発熱箇所の推測

機械加振に伴う発熱箇所として現在考えられている所は、前述したように超電導コイルとコイル締め付け金具との間であると推定しているが、レーストラック周上のどのあたりで発熱しているかをさらに見極めるために、機械曲げ加振を行ったC型SCコイルの内槽を分解して、コイル上に施行しているカプトンテープ表面（内周、外周、側面）の摺動痕を見た結果（スケッチ）を Fig. 10 に示す。摺動痕の場所に関する特徴としては、次のようであった。

Fig. 10 Aspect of the surface of Kapton tapes existing between fasteners and coil of C type.

Fig. 11 Fixture of search coil detecting the relative displacement between SC coil and inner vessel.

(1) 内周側一両円弧部 (14~29, 43~58) に強い摺動痕+圧痕が見られる。また加振時に左右方向に滑ったと思われる痕が全箇所に見られた。

(2) 外周側一直線部には摺動痕はなく、コイル直線部と円弧部との境界付近に左右方向に滑った摺動痕が見られる。

(3) 側面側一円弧部において 11~18, 23~28, 42~48, 51~56 といった部分には、内周側に圧痕が認められたが、摺動痕は見られなかった。

(3)の圧痕については、内槽組み立て時に生じたものと推測しており、摩擦発熱の主要発生場所は(1)(2)の摺動痕がついたあたりと予想される。

4.2 摩擦部の摺動量

供試した三つの超電導コイルユニットは、超電導コイル部を取り付け金具を介して内槽で充分締めつけた構造としているために、通常の振動等では両者は一体で動いているが、共振等においては両者間に相対滑りが生じるものと思われる。

この摺動量の大きさを推定するために、C型コイル部内槽表面にサーチコイルを Fig. 11 のように取り付け、その出力を調べた。その結果加振力が 150 kgf (1.47 kN) の時には加振周波数と磁界変化から求めたコイルと内槽間の相対変位はおよそ数 μm 程度であると算出された。

またB型SCコイルを用いた振れモード加振した際、クエンチ限界試験時の発熱量と、実験時の加速度よりコイルの変形を仮定し、3階微分をとることにより求めた剪断力から摺動量を求めると、約 10 μm と推定され、オーダ的には前述の値と合っている。さらに剪断力の大きい所は、コイル変形の曲率が変化する部分、すなわち振動モードの節の近傍となっている。このことは機械加振時の発熱現象が剪断力に伴う滑り摩擦であるとなると、超電導コイルの変形モードが曲げモードの時に比べて、振れモードの時の方が振動の

節が多く、振れモードでは発熱量も大きいという試験結果と符合している⁶⁾。

5. ま と め

超電導コイルから発する強力な磁場中で、超電導磁石の外槽、シールド板等の導体が振動することに伴う渦電流による発熱現象以外に、機械的に超電導コイルを振動変形させても相当な発熱を生じることがわかった。その特性として、・曲げ変形モードより振れ変形モードで発熱量が大きいこと、・励磁と無励磁状態で熱負荷増分特性にあまり差がないこと、等がわかってきた。

熱負荷増分がコイルの振動に伴う物理的量(例えば、コイルの変形速度、絶対速度)とどのような関係にあるのかを見極める必要があるが、まだ統一した見解は現在のところ出せていない。

これまで実施してきた各種試験結果をもとに摩擦発熱箇所の推測をしているが、細部の裏付けが取れていないので、今後さらに発熱要因分析を深度化すると同時に、次のような事項を検討することになっている。

(1) 超電導コイルと取り付け金具間に隙間を故意に設けて、摩擦発熱の原因となる接触をなくして、機械加振を行ってみる。

(2) 感度面において非常に困難と予想されるが、常温において超電導コイルを加振し、発熱箇所の分布を推測する。

(3) 超電導コイルと取り付け金具間のスペーサの材質を変えて加振してみる。

以上述べた機械的加振を受ける超電導コイルの挙動に関して、直接引用できる海外文献はないが、参考文献としては2), 3), 4) があげられるので参照されたい。

本研究は運輸省の補助金を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) 鈴木栄司: 低温工学 **29** (1994) 495
- 2) T. Yazawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 312
- 3) V. I. Dotsenko, I. F. Kislyak and N. M. Chaykovskaya: Cryogenics **30** (1990) 894
- 4) G. W. Knight and D. Evans: Cryogenics **31** (1991) 292
- 5) 齊藤実俊ら: 第49回低温工学・超電導学会講演概要集 (1993) 81
- 6) 大森順次ら: 第50回低温工学・超電導学会講演概要集 (1993) 295