

浮上案内コイルの電磁加振試験による耐振動特性評価

池田 遼平* 水野 克俊** 田中 実*

Evaluation of Vibration Resistance of Levitation and Guidance Ground Coils
by Electromagnetic Excitation Tests Using a Superconducting Magnet

Ryohei IKEDA Katsutoshi MIZUNO Minoru TANAKA

During superconducting Maglev vehicles running, ground coils vibrate due to the reaction force of levitation force and guidance force. In electromagnetic excitation tests, a ground coil is vibrated under the strong magnetic field of a superconducting magnet. In this paper, we describe an examination of test conditions based on numerical analysis, a processing method for energizing only an unit coil to be evaluated, and the electromagnetic excitation test results of the levitation and guidance coil. We have evaluated the vibration resistance of levitation and guidance ground coils by electromagnetic excitation tests.

キーワード：地上コイル，電磁加振，超電導磁石，機械加工

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道のリニア車両には鉄車輪やパンタグラフがなく、地上とは完全非接触の状態です。これを可能にしているのが地上コイルである。浮上式鉄道の基本構成を図1に示す。地上コイルは、リニア車両に対して、推進力、浮上力、案内力を与えるためにガイドウェイ側壁に取り付けられた電磁石である。地上コイルには、推進コイルと浮上案内コイルの2種類があり¹⁾、図2に示す浮上案内コイルは、超電導磁石との相互作用によって車両に浮上力と案内力を与えている。浮上案内コイルは、車両通過毎に浮上力や案内力の反力を受けて加振されるため、機械的強度や振動に対する動的耐久性が要求される。

地上コイルの耐久性検証の一つに、超電導磁石を用いた電磁加振試験²⁾³⁾がある。超電導磁石磁場中で地上コイルに交流を通电することで、繰り返し加振する試験である。機械的载荷とは異なり、地上コイル導体に直接電磁力が加わる点が大なる特徴である。

浮上案内コイルは超電導磁石の通過により浮上電流が誘起される仕組みであり、ケーブル接続端子から浮上電流を直接通电できない回路構成となっている。そのため、電磁加振試験は上側単位コイルと下側単位コイルに別々の通电ができる専用設計²⁾の浮上案内コイル（試験用コイル）を用いて実施してきた。しかし、保守作業において重要な交換時期の推定には、実際の浮上案内コイルを用いて電磁加振試験を行い、振動に対する余寿命を評価する必要があると考えられる。

本研究では、実際の浮上案内コイルの電磁加振試験を実現するため、電磁界解析と構造解析により試験条件の検討を行った。また、ケーブル接続端子から浮上案内コイルの評価対象箇所のみに通電するため、機械加工による回路変更を行い、実際に電磁加振試験による耐振動特性の評価を行ったので報告する。

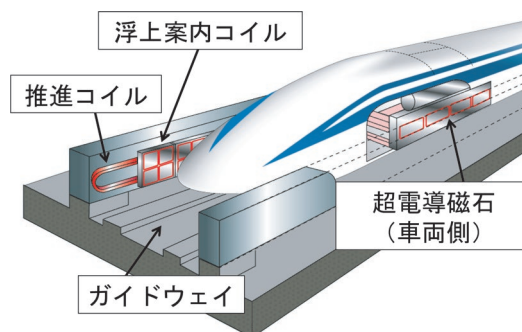


図1 浮上式鉄道の基本構成

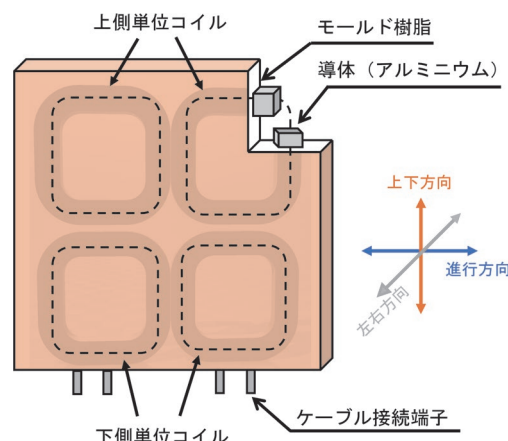


図2 浮上案内コイルの構造

* 浮上式鉄道技術研究部 磁気浮上研究室

** 元 浮上式鉄道技術研究部 旧低温システム研究室

2. 浮上案内コイル

2.1 浮上案内コイルの構造

浮上案内コイルは、鉄心のない空芯コイルである。上下に矩形の単位コイルを組み合わせ、それを左右に2組まとめて1個のコイルとなっている。車上の超電導磁石との間に繰り返し働く電磁力を負担するために、アルミ導体の巻線コイルをモールド樹脂で一体成形することで剛性を高めている。なお、浮上案内コイルは、ガイドウェイの両壁にボルト・ナットで締結される仕組みになっている。

2.2 浮上案内コイルに作用する電磁力

浮上案内コイルに浮上電流が通電されると、図2に示す上下方向に浮上力の反力が加わる。また、左右方向にも電磁力が加わり、上側単位コイルにはガイドウェイから引き剥がされる方向、下側単位コイルにはガイドウェイに押し付けられる方向に力が作用する。特に上側単位コイルに作用する引き剥がし力は締結部のボルトだけで荷重を支えているため、締結部付近に応力が集中する⁴⁾。一方、下側単位コイルに発生する押し付け力は、コイル背面等で荷重を受けることができる。従って、実際の浮上案内コイルの耐振動特性評価では、上側単位コイルに作用する引き剥がし力を模擬する必要がある。

2.3 浮上案内コイルの回路構成

実際の浮上案内コイルは、上側単位コイルと下側単位コイルが並列接続となっているため、外部から通電すると、上下単位コイルに同じ向き案内電流が流れる。そのため、現状の回路構成のままでは、上下単位コイルに逆向きの電流が流れる浮上電流を模擬できない。そこで、実際の浮上案内コイルのうち、引き剥がし力が加わる上側単位コイルを評価対象として、必要な電磁力が加わるように、数値解析に基づく試験条件や回路構成を検討した。

3. 数値解析に基づく試験条件検討

実際の浮上案内コイルの電磁加振試験を実現するには、上側単位コイルに対して、試験用コイルに働く左右方向の電磁力を再現する必要がある。ここでは、実際の浮上案内コイルに500km/h走行時の電磁力相当の負荷を与える試験条件を検討した。浮上案内コイルの通電条件として、回路構成を変更して上側単位コイルのみに通電した場合と、下側単位コイルのみとした場合の電磁力と応力を計算した。また、試験用コイル（上下異極）に浮上電流を通電した場合の結果（目標とする応力）と比較し、電磁力を強化する方法を検討した。

3.1 均衡変位における応力予測

初めに電磁界解析により電磁力の計算を行った。ただし、電磁加振試験における浮上案内コイルの変形量は微小であるため連成解析は省略した。次に構造解析では、電磁界解析で得られた電磁力を各単位コイルに設定することで応力分布を計算した。

(1) 電磁界解析

電磁界解析の解析モデルを図3に示す。ここでは、浮上案内コイルの導体部と超電導コイルのみをモデリングした。浮上案内コイルと超電導コイルは進行方向に対して変位をゼロとし、対称性を考慮した1/2モデルで計算した。通電条件は、超電導コイルを250A（起磁力700kA）、浮上案内コイルを2000Aとした。上下変位は、43.9mm（時速500km/hにおける均衡変位）として計算を行った。

浮上案内コイルに働く電磁力（荷重）を図4に示す。上下単位コイルではそれぞれコイル巻線の向きが異なる。そのため、左右方向の荷重を見ると、上側単位コイルは吸引力（負）、下側単位コイルは反発力（正）となっている。試験用コイル（上下異極）の荷重は、上下単位コイルの荷重の合計となっている。

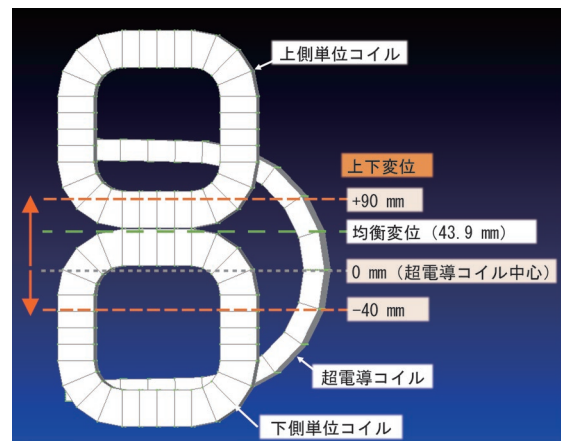


図3 電磁界解析モデル

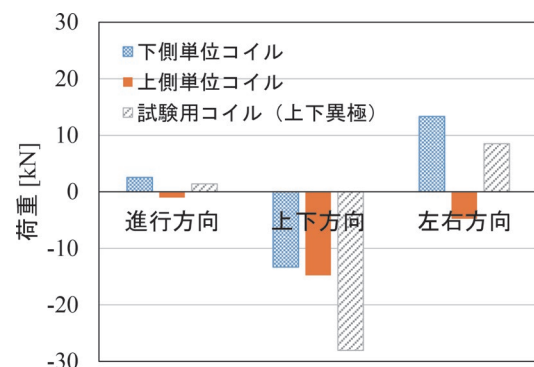


図4 浮上案内コイルに働く電磁力（均衡変位時）

(2) 構造解析

構造解析では、電磁界解析で得られた電磁力を各单位コイルに設定することで応力分布の予測を行った。浮上案内コイルの構造解析モデルを図5に示す。ここでは、コイル導体部だけでなく、モールド樹脂や背面の支持構造、締結ボルトまで再現している。締結ボルトはビーム要素、それ以外はソリッド要素とし、締結部接触面の摩擦もモデル化した。要素数は約33000である。なお、別途行ったモーダル解析では、浮上案内コイルの1次共振周波数は240Hzであった。これに対して電磁加振試験での加振周波数は100Hz程度と十分に低く、振幅倍率は1に近いことが予想される。従って、構造解析による応力分布の予測は静荷重で行っている。

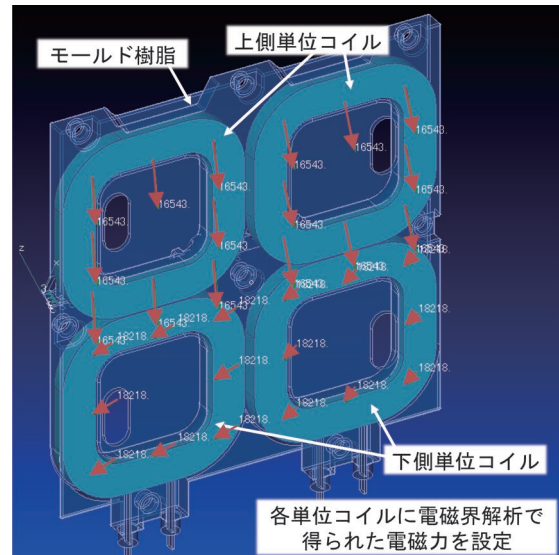
例として、浮上力を模擬した試験用コイルの電磁加振時のミーゼス応力分布と変形形状を図6に示す。変位は拡大して図示している。上側単位コイルの変形形状は、吸引力が働く軌道中心方向に膨らんでいる。下側単位コイルの変形形状は、超電導磁石からの反発力でガイドウェイ側に押し付けられている。次に応力集中は、ボルト締結部周辺で発生しており、単位コイルの周辺などその他の位置ではミーゼス応力が極めて小さくなっている。

各条件における最大ミーゼス応力は、上側単位コイル：19MPa、下側単位コイル：15MPa、試験用コイル：25MPaとなっている。上側単位コイルと下側単位コイルの最大ミーゼス応力を比較すると、上側単位コイルの方が大きくなっている。これは、支持構造に由来すると考えられる。下側単位コイルは、コイル背面で押し付けられる荷重を受け持つのに対し、上側単位コイルは、締結部のボルト頭だけで引き剥がされる荷重を支えているためである。しかしながら、目標には達していないので上側単位コイルを評価対象として、試験用コイルにおける500km/h走行時の電磁力相当の負荷を再現するには、試験条件の変更による電磁力の強化が必要である。

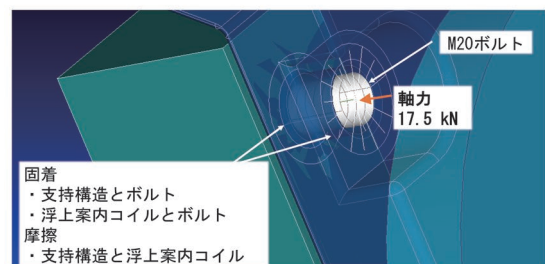
3.2 電磁力の強化

上側単位コイルのみを評価対象とし、試験用コイルにおける電磁加振試験と同等の負荷を与えるための試験条件について検討した。図3に示すように、超電導コイルの上下辺と上側単位コイルの上下辺の距離を調整することで、電磁力の強化を試みた。上下変位を-40mmから+90mmの範囲で変化させた際に上側単位コイルに働く電磁力を図7に示す。進行方向および上下方向の電磁力はほぼ一定であるのに対して、左右方向の電磁力のみが上下変位と比例して変化している。図7における緑線は均衡変位(43.9mm)、赤線は試験装置の限界(-20mm)を示している。上下変位を-20mmまで下げると吸引方向に10kNを超える電磁力が働くことになり、均衡変位と比較すると2倍以上の電磁力を加えることができる。

構造解析で得られた左右方向の最大ミーゼス応力の比較を図8に示す。上下変位を-20mmとした時の上側単位コイルの最大ミーゼス応力は25MPa程度となり、目標とする応力とほぼ等しくなっている。浮上案内コイルの変形形状という点では、下側単位コイルが加振されな



(a) 浮上案内コイルモデルと電磁力の設定



(b) ボルト締結部

図5 浮上案内コイル構造解析モデル

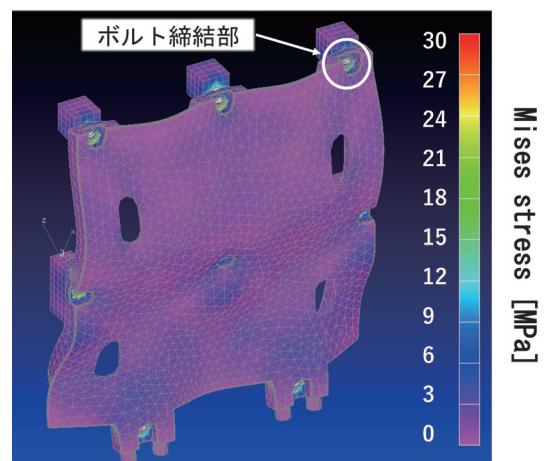


図6 ミーゼス応力分布と変形形状 (500km/h 走行時の電磁力相当)

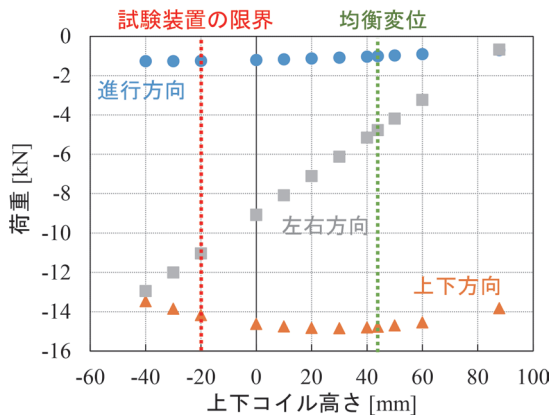


図7 上側単位コイルに働く電磁力

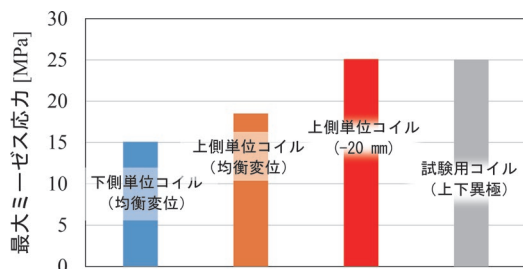


図8 最大ミーゼス応力の比較 (左右方向)

いものの、ボルト締結部に応力集中することは再現されている。

以上より、実際の浮上案内コイルに500km/h走行時の電磁力相当の負荷を与える試験条件として、上側単位コイルのみに通電を行い、上下変位を-20mmに設定する方法が有効と考えられる。

4. 回路変更のための機械加工方法

上側単位コイルのみを加振対象とし、評価対象の単位コイルのみに通電するための回路変更方法を検討した。回路変更のための機械加工方法を図9に示す。下側単位コイル導体の一部に機械加工を施して回路を切断した。機械加工にはディスクグラインダーを使用し、ミリオームハイテスタで抵抗を測定して回路の切断を確認した。なお、ディスクグラインダーによる切削箇所は、加振中に導体が短絡する懸念や機械的強度が低下している可能性がある。そのため、エポキシ樹脂を用いて切削箇所の穴埋めを行い、絶縁処理と補強を行った。

回路変更のために機械加工した浮上案内コイルについて、ケーブル接続端子より通電を行った結果、下側単位コイルには電流が流れず、上側単位コイルのみに通電されたことをサーモカメラで確認した(図10)。また、機械加工による局所的な発熱などの異状は見られなかった。

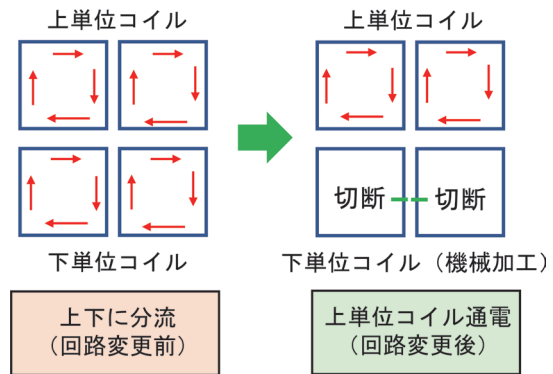


図9 回路変更のための機械加工方法

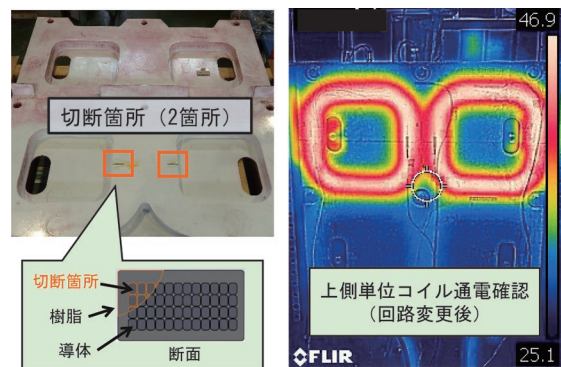


図10 通電確認 (回路変更後)

5. 浮上案内コイルの電磁加振試験

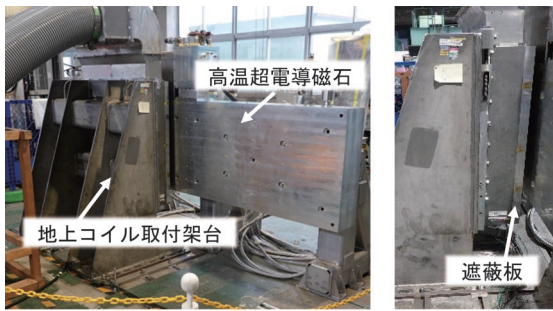
浮上案内コイルの上側単位コイルのみを対象として、500km/h走行時の電磁力相当の負荷を与える電磁加振試験を実施した。

5.1 電磁加振試験方法

試験構成を図11、供試体の外観を図12に示す。供試体は、前記の機械加工を施した浮上案内コイルである。上下変位は、地上コイル取付用架台で高さを調整し、図13に示すように43.9mm(均衡変位)と-20mm(電磁力強化)の2パターンとした。超電導磁石⁵⁾は起磁力700kAの直流励磁とした。浮上案内コイルの加振周波数は100Hzとし、直流電流990A、交流電流990A(100Hz)を上側単位コイルに通電した。

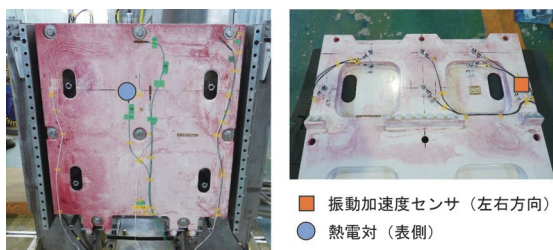
5.2 試験結果

電磁加振で取得した浮上案内コイルの振動波形を図14に示す。また、振動加速度センサの設置位置を図12(b)に示す。どちらの設置位置でも上側単位コイルに加振力が与えられていることを確認した。振動加速度の基本波成分の振幅値の比較を図15に示す。上下変位43.9mm(均衡変位)の振動加速度の振幅は20m/s²程度となったの



(a) 試験状況 (b) 側面

図 11 電磁加振試験の構成



(a) 表側 (b) 裏側

図 12 供試体の外観

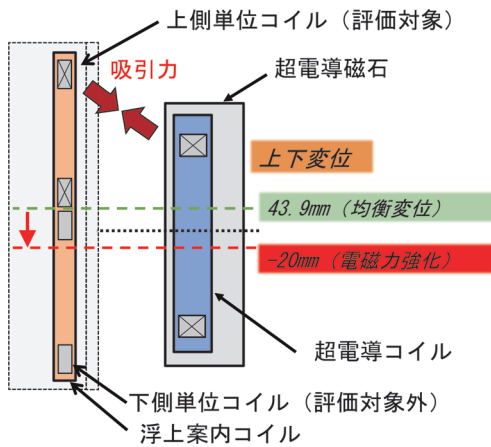
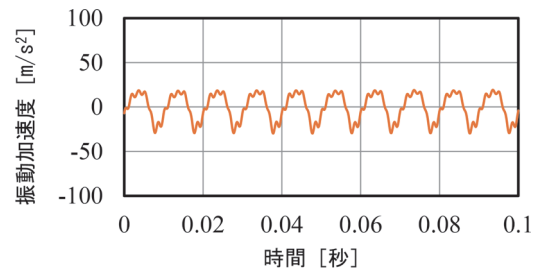


図 13 上下変位の高さ調整 (断面図)

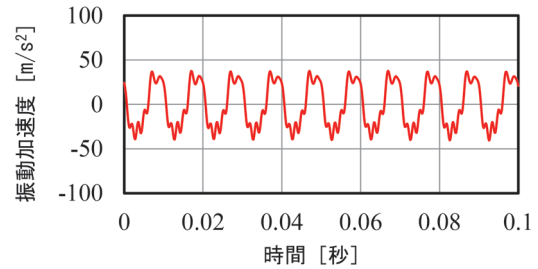
に対して、上下変位 -20mm (電磁力強化) は 35m/s^2 程度となり、位置の変更により振動加速度が約 1.7 倍大きくなり、電磁力が強化されていることを確認した。

6. 電磁加振試験による耐振動特性評価

機械加工を施して上側単位コイルのみに通電可能とした浮上案内コイルに対し、耐振動特性評価のための電磁加振試験を実施した。



(a) 上下変位 43.9mm (均衡変位)



(b) 上下変位 -20mm (電磁力強化)

図 14 電磁加振試験の振動波形 (左右方向)

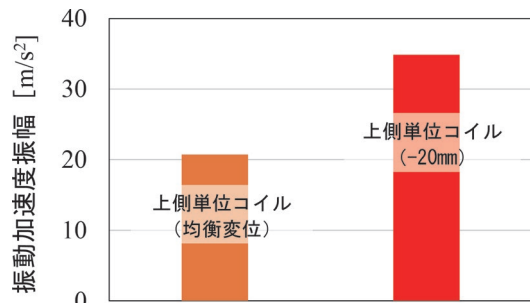


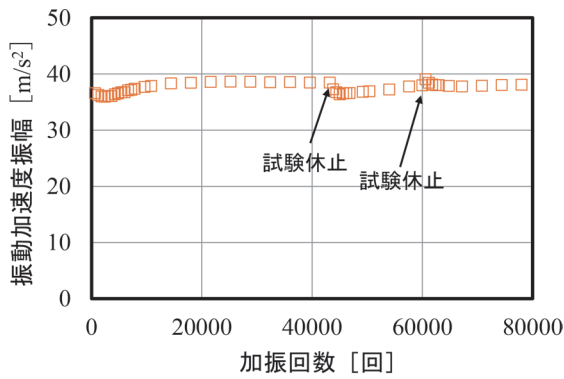
図 15 振動加速度振幅の比較
(基本波成分：左右方向)

6.1 試験条件

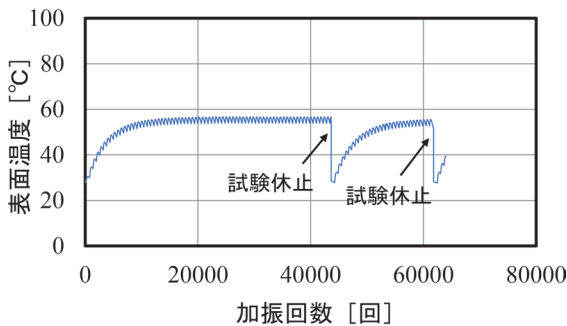
上下変位は -20mm (電磁力強化) として、通電電流の大きさは 5.1 節と同一とした。通電パターンはコイルの温度上昇を考慮して、300 秒間の中で、6 秒間通電、294 秒間休止のサイクルとした。このサイクルを 130 セット行ったため、総加振回数は 78000 回となる。電磁加振試験中に、図 12(b) に示す位置の振動加速度と温度の各データを取得した。

6.2 試験結果

電磁加振時に取得した振動波形に対して基本波成分の振幅値の経時変化を確認した。浮上案内コイルの振動加速度と温度を図 16 に示す。図 16(a) に示すように、試験開始時と試験休止後の再開のタイミングで振動加速度が変化したものの、その後は一定値となった。図 16(b)



(a) 振動加速度振幅



(b) 温度

図 16 耐振動特性評価

の温度データより、振動加速度の変化は、通電に伴う温度変化の影響によるものと考えられる。

また試験前後にモールド樹脂の表面状態を確認するため、カラーチェックを行った。今回の加振回数では、クラック等の異状は検出されなかった。また、加振中においても切削した箇所での局所的な発熱などの異状は見られなかった。以上により、実際の浮上案内コイルにおいても耐振動特性を評価できる見通しが得られた。

7. まとめ

実際の浮上案内コイルの振動に対する余寿命評価手法を確立するため、機械加工により回路構成を変更した浮上案内コイルと高温超電導磁石を対向させ、評価対象の上側単位コイルのみを通電して加振する電磁加振試験を実施した。

数値解析と取得した振動データより、高温超電導磁石と浮上案内コイルの上下変位を調整することで、上側単位コイルに500km/h走行相当の電磁力が加えられることを確認し、耐振動特性を評価できる見通しを得た。今後は長期間の電磁加振試験により、振動に対する余寿命評価を実施する予定である。

文献

- 1) 藤本健, 饗庭雅之, 鈴木裕之, 梅木健, 中村誠一: 山梨実験線浮上案内コイルの電磁力特性, 鉄道総研報告, Vol.13, No.9, pp.15-18, 1999
- 2) 饗庭雅之, 村井敏昭, 鈴木正夫, 藤本健, 戸来年樹, 長嶋賢: 超電導磁石磁界を利用した地上コイル電磁加振試験, 鉄道総研報告, Vol.14, No.11, pp.33-38, 2000
- 3) 田中実, 饗庭雅之, 鈴木正夫: 地上コイル耐久性評価用電磁加振試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.17-22, 2006
- 4) 松江仁, 饗庭雅之, 鈴木正夫: FRP プッシュを適用した推進浮上案内兼用コイルの応力評価, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.17-22, 2008
- 5) 水野克俊, 田中実, 小方正文: 希土類系高温超電導磁石を用いた地上コイル電磁加振試験, 鉄道総研報告, Vol.34, No.11, pp.5-10, 2020