浮上式鉄道用推進コイル接続ケーブルの振動特性評価

太田　聡*　饗庭　雅之**　鈴木　正夫***　高橋　紀之*

Vibration Characteristics Evaluation of Connection Cable of Propulsion Coils for Maglev

Satoru OTA　Masayuki AIBA　Masao SUZUKI　Noriyuki TAKAHASHI

High voltage is applied to the propulsion coil which propels vehicles in superconducting maglev systems at the time of the passage of the vehicle. We need to treat the connection cable for connecting the propulsion coils as high-voltage equipment because high voltage is applied to the cable. The connection cable is used in unique conditions: connection at an extremely short space, electromagnetic force applied by the variable magnetic field of superconducting magnet of the vehicle. In this paper, we describe vibration characteristics of the connection cable obtained by the electromagnetic excitation test using magnetic field of superconducting magnet.

キーワード：浮上式鉄道，推進コイル，接続ケーブル，接続部，機械特性，電磁加振

1．はじめに

超電導磁気浮上式鉄道において地上コイルは，車両が走行する全区間のコンクリート製ガイドウェイに締結部を介して固定される。そのため，対象となる数は膨大なものとなる。また，地上コイルには，他の車両関係機器とは異なる複数の負荷が複合して加わる，といった特殊な使用環境を考慮する必要がある。複合負荷とは，車両に搭載された超電導磁石が通過する際に発生する電磁力による機械的負荷，同時に発生する高電圧による電気的負荷，屋外での使用による紫外線や水分などの化学的負荷が主である。地上コイルはこれらの負荷が長期間加わりながら使用されることが前提となるため，長期的な耐久性を有する地上コイルの開発と耐久性評価の実施が必須である。それに加えて，膨大な数が対象となるため，コストの低減や効率的な保守管理手法の適用にも留意する必要がある。地上コイル間を接続して電気回路を構成するために必要な接続ケーブルもまた，地上コイルと同様の耐久性を求められる。

本報告では，浮上式鉄道用推進コイル接続ケーブルを対象とした耐久性評価方法の検討に資する，ケーブルの電磁加振による振動特性評価について述べる。

2．ケーブルへの負荷と接続部の耐久性評価

2.1　地上コイルの耐久性試験

これまで筆者らの研究グループにおいては，地上コイルの浮上式鉄道車両に対する3つの機能である，推進，浮上，案内の各役割を兼用し，かつ耐振動性能に優れたFRP製締結部を有する推進･浮上･案内兼用コイル（PLGコイル）を設計，開発し，各種耐久性試験の実施を通して性能を評価して，同時に地上コイルの耐久性評価試験方法について検討を行ってきた[1) 2)]。

同様に，地上コイル間の接続ケーブルに関しても，先述の各種負荷について考慮が必要である。接続ケーブルのうち，推進系回路を構成する推進コイル接続ケーブルについては，浮上式鉄道車両通過時において推進コイルと同時に高電圧が印加されるため，一般的な高電圧機器と同様の考慮が必要である。それに加えて，推進コイル接続ケーブルは一般的な電力ケーブルとは異なり，地上コイル数個分の間隔で地上コイルの端子に接続されており，高電圧機器として重要な箇所となる接続部の数も膨大なものとなる。したがって，短い間隔での接続に起因する各種特性の電力ケーブルとの相違や，地上コイル本体と同様の耐久性について考慮する必要がある。地上コイル本体や接続ケーブルの負荷要因と対応する耐久性試験の実施例について表1に示す。

PLGコイルにおいても表1の負荷要因を考慮した耐久性試験を行っており，電気的負荷を模擬した長期屋外

表1　地上コイル本体や接続ケーブルへの負荷要因と耐久性試験の実施例

負荷要因	対応する耐久性試験
機械的負荷	電磁加振試験[3)]
電気的負荷	長期屋外課通電試験[4)]
化学的負荷	耐候性試験

＊　浮上式鉄道技術研究部　電磁システム研究室
＊＊　浮上式鉄道技術研究部
＊＊＊　浮上式鉄道技術研究部　山梨実験センター

課通電試験[5]や，化学的負荷を模擬した耐候性試験[6]では，接続ケーブルを含めた形での評価を行っている。

2.2　接続ケーブルへの機械的負荷要因の検討

PLG コイルの施工を想定した場合，推進系回路だけでなく，案内系回路についても接続ケーブルが特別高圧ケーブルであることが必要である。このため，浮上案内コイルへ接続する案内系回路の施工とは異なり，ガイドウェイとの接触や接続ケーブルの施工最小曲げ半径などの制約が発生することが懸念されたため，実規模のガイドウェイと地上コイル，ケーブルを用いて施工性検証試験を実施した[7]。施工性検証試験においては，先述の制約を満たす案内系回路用接続ケーブルの取り回しと，推進系回路用接続ケーブルの固定方法を主な施工条件とし，検討と実証を行った。施工性検証試験の結果より，図 1 に示す推進系回路用接続ケーブルを 3 本個別にクリート（固定部）に固定した場合，また，図 2 に示す推進系回路用接続ケーブルを 3 本まとめて固定した場合のいずれにおいても，問題なく施工が可能であることがわかった。

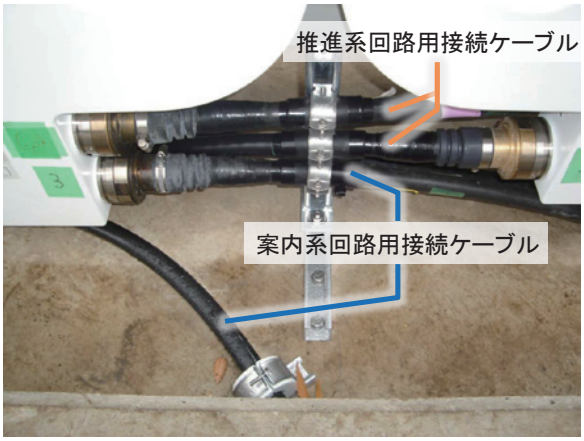


図 1　PLG コイルの接続ケーブル
（推進系回路用ケーブル 3 本個別固定）

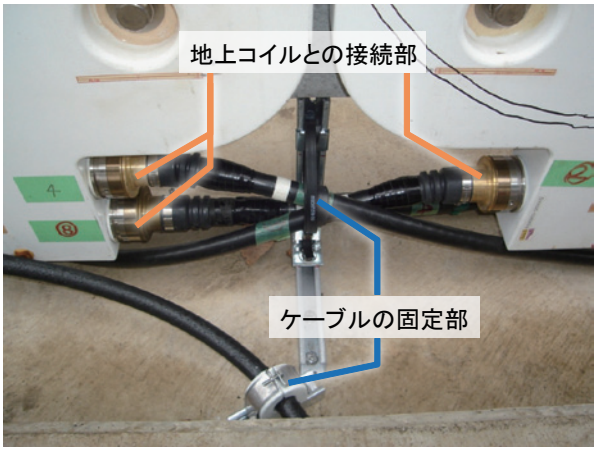


図 2　接続ケーブルの接続部と固定部
（推進系回路用ケーブル 3 本まとめ固定）

2.3　ケーブル接続部の耐久性評価

接続ケーブルの電気的負荷に対する絶縁性能評価においては，当初は高電圧機器としての重要箇所の一つである地上コイルとの接続箇所に着目し，負荷要因の把握や評価試験を実施した。地上コイルとケーブルの接続部は，モールド樹脂と絶縁ゴムが一定の接触圧をもって密着して絶縁を保つ構造となっており，当該部位における異物の混入や，接触圧の不足による空隙の発生が絶縁特性に影響を与えると考えられる[8]。PLG コイルと接続ケーブルを接続した状態で，周辺温度を変化させた際に取得した接続界面の接触圧力（嵌合界面圧力）の温度特性を図 3 に示す[9]。PLG コイル接続部はケーブル側にバネ構造を有しており[1]，低温環境下においても界面に空隙が発生しないことが確認できた。

地上コイルとの接続箇所においては，屋外温度の変化による接続嵌合界面への影響や，ケーブル本体の電磁力による振動による接続嵌合界面への影響とともに，長期間の振動の蓄積によるケーブルの絶縁ゴムの疲労劣化も考慮する必要がある。そこで，筆者らの研究グループは，PLG コイルのケーブル接続部に掛かる動的な機械的負荷を発生させ，ケーブル接続部を評価する試験を行うために，ケーブル接続部動的評価試験装置を開発し[10]，接続部から一定距離をおいた箇所のケーブル本体を強制的に機械加振することで，接続部の嵌合界面圧力への影響を評価した。ケーブル接続部動的評価試験装置の外観を図 4 に，ケーブル接続部から 350mm 離れた箇所のケーブルを強制変位 1mm および 10mm で周波数掃引を行った際の嵌合界面圧力の周波数特性を図 5 に示す。図 5(a) における高周波数での加振を行った場合，また，図 5（b）のように大振幅で加速度の大きな加振を行った場合のいずれにおいても，ケーブル接続部の嵌合界面圧力の変動は定常圧力と比較しても軽微であった。これは，ケーブル本体の絶縁体の材料，ケーブル接続部のストレスコーン（地上コイルとの嵌合面を構成する部材）のどちらも

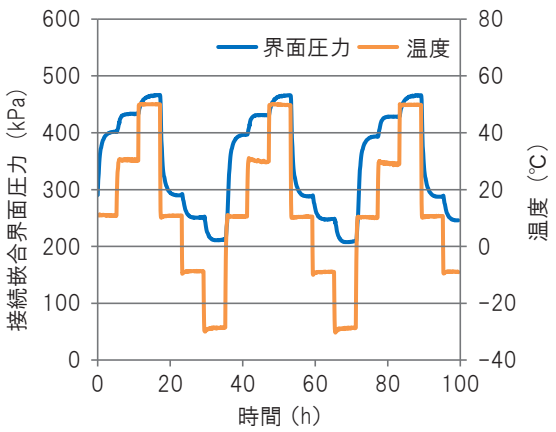


図 3　PLG コイル－接続ケーブル間の接続界面嵌合圧力の温度特性[9]

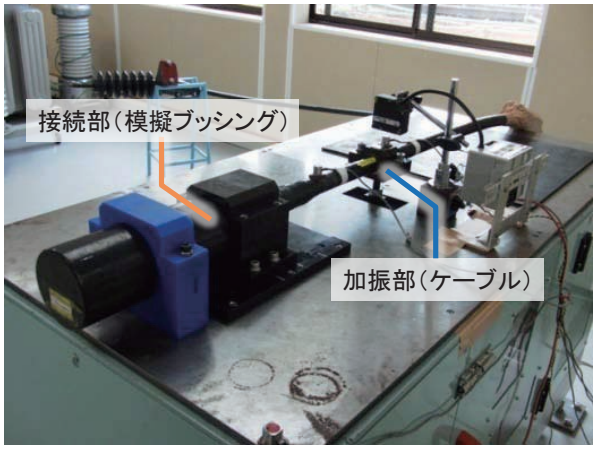
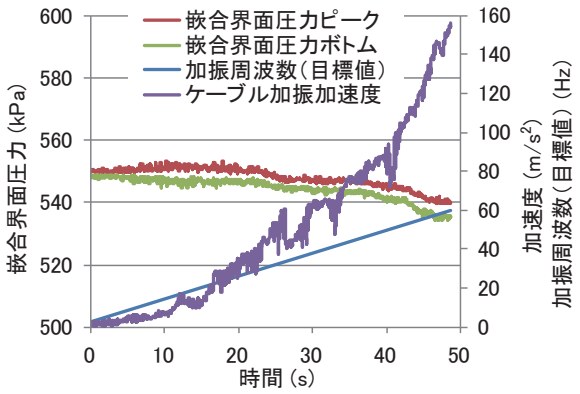
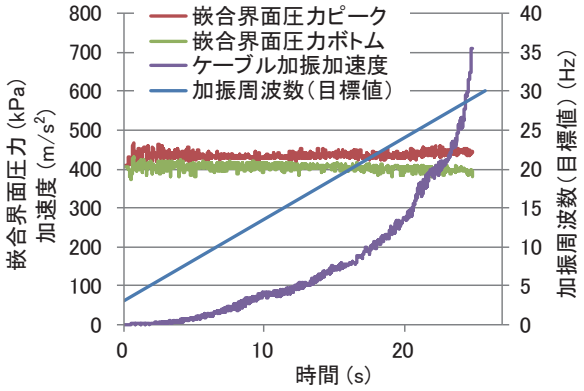


図４　ケーブル接続部動的評価試験装置の外観



（a）強制変位1mm



（b）強制変位10mm

図５　PLG コイル－接続ケーブル間の接続嵌合界面圧力の加振周波数特性

PLG コイル本体と比較すると軟らかく，たとえケーブル本体部が大変位したとしても，高周波数ではケーブル接続部には軽微な影響しか与えないためであると考えられる。この評価に続き，ケーブルを長期間加振する耐久性試験も実施し，長期間の加振においても嵌合界面圧力の変化は静的状態に対して軽微で，かつ失われないことを確認している[10]。

３．ケーブル本体の振動特性評価

3.1　ケーブル本体への負荷要因の整理

PLG コイルに関する過去の研究開発においては，前章で述べた通り，コイルとケーブルの接続部の現象把握や特性評価に主眼を置いてきた。PLG コイル用接続ケーブルの構造断面を図 6 に示す。PLG コイル用接続ケーブルに用いられる CV ケーブルは，単独の要因で劣化が生じることは少なく，多くの場合，各種要因が重畳し複合的に作用することで劣化が発生し進行する[11]。また，構成する各部材それぞれが重要な役割を果たすため，各部材ごとに負荷（劣化）要因を把握し，整理しておく必要があると考えられる。表 2 に，PLG コイル用接続ケーブルの使用環境を想定した上で負荷要因として特に考慮すべき要因と，PLG コイルの評価試験における評価の状況を示す。表 2 より，PLG コイル用ケーブルの負荷要因の大半は PLG コイルとの評価試験時に併せて評価済みであるが，整理の結果，ケーブル本体においても機

表２　PLG コイル用接続ケーブルの使用環境を考慮した負荷要因として特に考慮すべき項目

負荷要因	考慮すべき項目（考慮方法）	状況
化学的負荷	紫外線と水が介在することによる吸水劣化（耐候性試験）	●
電気的負荷	長期間課電による劣化（課通電試験）	●
	雷インパルスなどの異常電圧印加による劣化（雷インパルス試験）	●
	接続部の施工時の異物混入による電気絶縁性能に対する負荷	●
熱的負荷	1 日の運用におけるヒートサイクルによる劣化（課通電試験）	●
機械的負荷	施工時のケーブル固定，引き回しに起因する負荷（施工性検証）	●
	長期間繰り返し作用する電磁力によってケーブル絶縁体や遮蔽層に掛かる負荷（加振試験）	
複合負荷	上記要因が複数関連して発生する負荷（複合負荷試験）	

※●は PLG コイルの評価試験を行う中で実施済みの項目

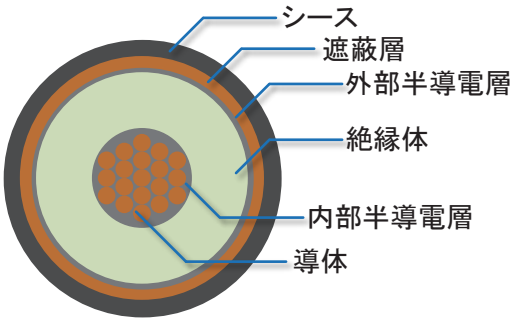


図６　PLG コイル用接続ケーブル構造断面

械的劣化を把握し，評価試験を実施する必要があることがわかった。

3.2　推進コイル接続ケーブルに作用する力

推進コイル接続ケーブルには，推進コイルへの通電のために流れる電流と，浮上式鉄道車両通過の際の超電導磁石の磁界との積に比例した電磁力が分布荷重として作用する。このような負荷は，既存の電力用ケーブルにはない超電導磁気浮上式鉄道特有のものである。

実走行でケーブルに作用する浮上式鉄道車両左右方向の電磁力の計算例[12]を図7に示す。ケーブルへの通電電流と掛かる磁場の関係がガイドウェイ内での相対的な位置関係により異なるため，その結果浮上式車両通行時にケーブルに作用する電磁力はそれぞれの位置で固有のものとなる。

3.3　ケーブルの電磁加振試験

推進コイル接続ケーブルに対する機械的負荷を，実使用時と同様の分布荷重で与えるために，定置の超電導磁石に対向させたケーブルに変動電流を通電することによって変動電磁力を発生させ，ケーブルを加振する電磁加振試験を実施した[12) 13)]。

本試験については，鉄道総研が所有する地上コイル電磁加振試験装置[3]を使用して行った。今回の試験では，試験用ケーブルを超電導磁石と対向させて設置し，インバータ電源よりケーブルに通電して加振した。推進コイル接続ケーブルは，推進コイルとの接続部以外では一定間隔で固定される。本試験ではこれを模擬するために，ケーブル支持間隔については推進系コイルの設置間隔である0.9mとした。電磁加振試験装置の外観を図8に，試験装置構成を図9に，試験状況を図10に示す。

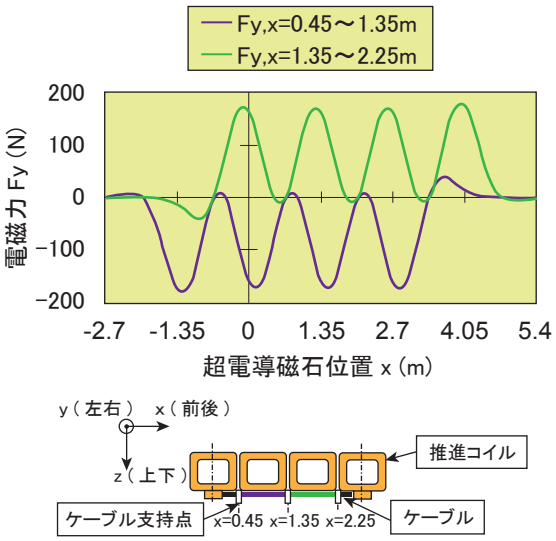


図7　ケーブルに作用する電磁力の計算例[12]

3.4　電磁加振試験結果

加振時に測定したケーブル中央の加速度から求めた変位波形の例を図11に示す。図11より，浮上式鉄道車両の高速走行時には，当該ケーブル区間への進入およびに退出時に発生すると考えられる比較的大きな変位に，車両通過中の高周波数の小変位振動が重畳する振動特性となることを確認した。

測定したケーブル中央の加速度から求めた直流通電によるケーブルの変位の電流特性を図12に，交流通電による振動周波数特性を図13に示す。これらの図より，ケーブルの変位は通電電流に比例し，ケーブルの変位応

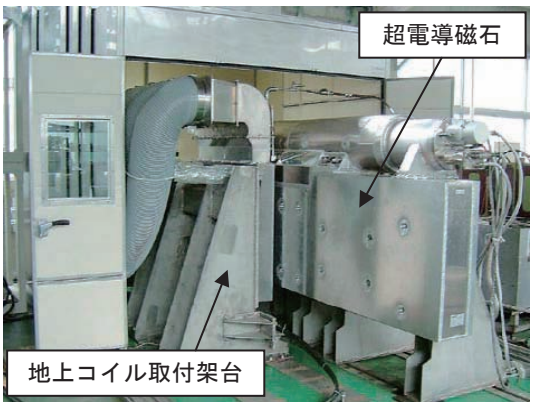


図8　地上コイル電磁加振試験装置

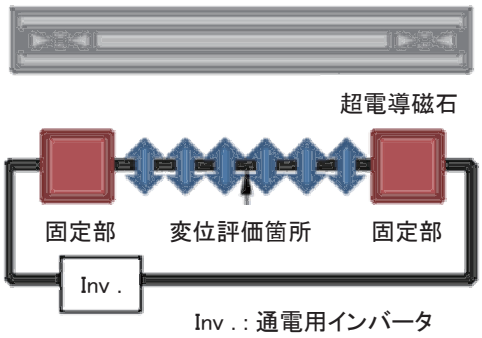


図9　試験装置構成（上面より）

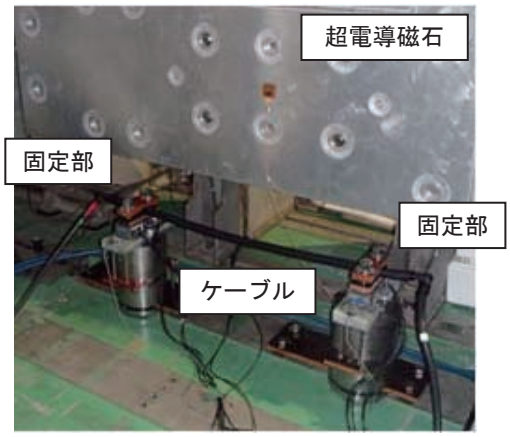


図10　試験状況

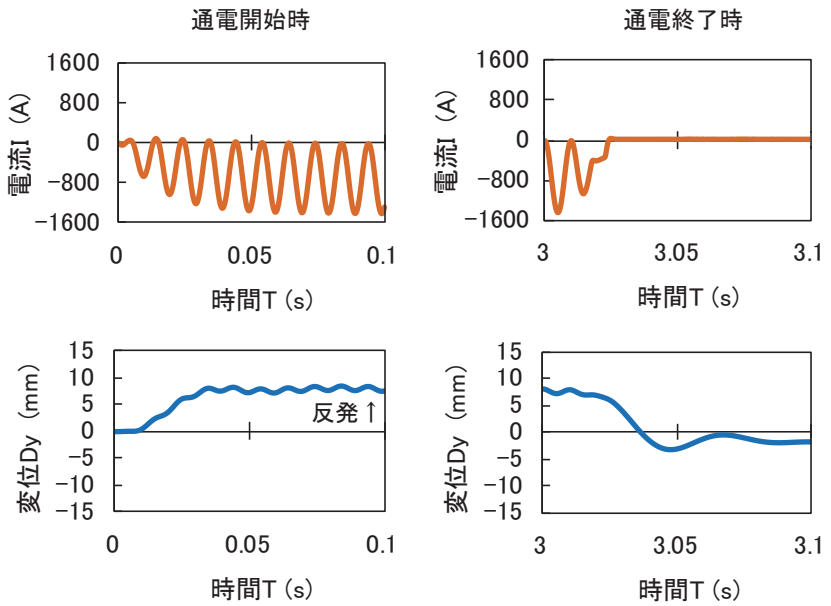


図 11　電磁加振試験における変位波形例（加振周波数 100Hz）

答倍率は，ケーブル支持構成の固有振動の影響により最大で約 1.1 倍になると推定される。

3.5　機械加振試験条件の検討

推進コイル接続ケーブルの本体の耐久性を評価するために，機械的負荷と電気的負荷を同時に与える複合負荷試験を行うことを考える場合，電磁加振試験では同時にケーブルへ高電圧を印加することができない。そこで，同時にケーブルへ高電圧を印加することが可能な機械加振試験の条件を，電磁加振によるケーブルの振動特性をもとに検討した。

推進系コイル間接続ケーブルの質量を m，減衰係数を c，ばね定数を k，変位を $D(t)$，ケーブルに作用する電磁力を $F(t)$ とすれば，電磁力により加振されるケーブルの運動方程式は式 (1) で表される。

$$mD''(t)+cD'(t)+kD(t)=F(t) \qquad (1)$$

ここで，m，c，k については，電磁加振試験結果から推定された 1.0[kg]，120[N/(m/s)]，12000[N/m] を用い，また，$F(t)$ については，図 7 を参考として浮上式鉄道車両の台車通過時に作用する電磁力を平均 100[N] ＋振幅 100[N] の正弦波 4 周期で近似し，式 (1) より $D(t)$ を計算した。$D(t)$ の波形例を図 14 に示す。

高速走行時では加振周波数に対する変位応答倍率が小さいため，浮上式鉄道車両の台車内の超電導コイル通過ごとの変位変動は小さく，主として台車全体の通過に対応した変位変動となることがわかった。

これより，図 15 に示すように，高速走行時のケーブル振動変位は，低周波数の正弦波による近似で模擬できると考えられる。

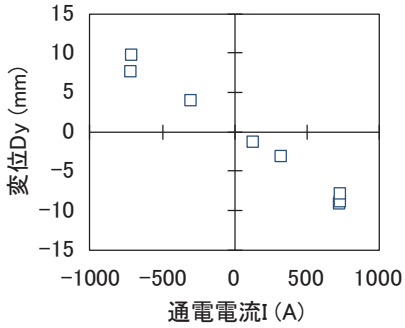


図 12　ケーブル変位の通電電流特性

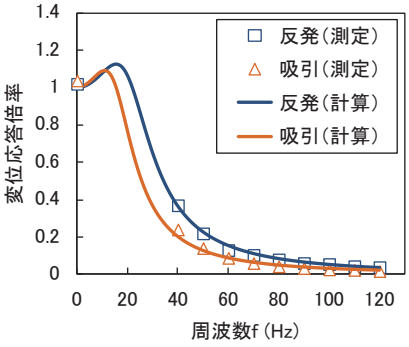


図 13　ケーブル変位の振動周波数特性

4．おわりに

浮上式鉄道用推進コイル接続ケーブルのケーブル本体の耐久性試験方法を検討するために，負荷要因を整理し，電磁加振試験を行って振動特性を評価し，これらの結果から，機械加振条件を検討した。今後は検討結果を基にケーブル本体の耐久性試験を行い，ケーブル接続部の耐久性試験結果と合わせて，浮上式鉄道用推進コイル接続

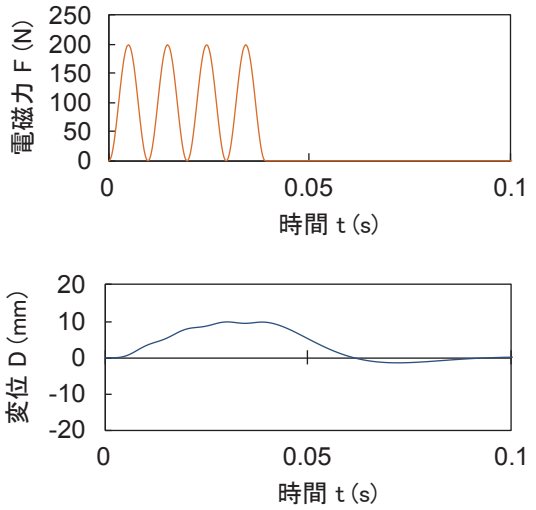


図 14　実走行時のケーブル変位波形
（車両走行速度 500km/h）

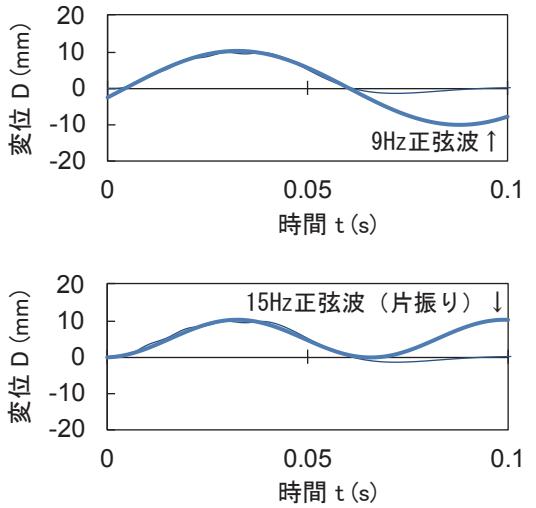


図 15　ケーブル変位波形の正弦波での近似
（車両走行速度 500km/h）

ケーブルの耐久性を評価する予定である。

なお，本報告で述べた研究の一部は，国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文　献

1）饗庭雅之，村井敏昭，鈴木正夫，高橋紀之：超電導磁気浮上式実用型 PLG コイルの開発，第 10 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp. 313-316，2003
2）松江仁，饗庭雅之，鈴木正夫：FRP ブ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
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）電気学会電気規格調査会：JEC-3411-2008 20kV 級（22kV，33kV）架橋ポリエチレンケーブルおよび接続部の試験法，pp. 9-13，2008
5）饗庭雅之，鈴木正夫：推進・浮上・案内兼用地上コイルの耐久性検証，鉄道総研報告，Vol. 19，No. 6，pp. 19-24，2005
6）太田聡，饗庭雅之：超電導磁気浮上式鉄道用地上コイル～ケーブル接続部の耐候性試験結果，電気学会平成 21 年電力・エネルギー部門大会論文集，pp. 36-37，2009
7）高橋紀之，鈴木正夫：PLG 方式地上コイルの配線施工性検証，鉄道総研報告，Vol. 26，No. 5，p. 33，2012
8）鈴木正夫，饗庭雅之，太田聡：界面の異状を模擬した地上コイル／ケーブル接続部の部分放電特性，平成 21 年電気学会全国大会論文集，p. 99，2009
9）太田聡，鈴木正夫，饗庭雅之：磁気浮上式鉄道用地上コイルのケーブル接続部における嵌合界面圧力特性，平成 23 年電気学会全国大会論文集，p. 112，2011
10）鈴木正夫，太田聡，高橋紀之：推進系地上コイルのケーブル接続部を対象とした動的耐久性検証，平成 24 年電気学会全国大会論文集，p. 246，2012
11）電気学会・技術伝承を目的とした電力設備の絶縁診断技術調査専門委員会：電力機器・設備の絶縁診断技術，オーム社，p. 52，2015
12）饗庭雅之，太田聡：超電導磁気浮上式鉄道の推進用地上コイル間ケーブルの電磁加振試験，平成 28 年電気学会全国大会論文集，p. 271，2016
13）太田聡，饗庭雅之：超電導磁気浮上式鉄道用地上コイル間接続ケーブルの耐久性評価手法の検討，平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集，pp. 8-3-7 - 8-3-8，2016