

3501 磁気浮上式鉄道車両運動評価用試験装置の開発

正〔機〕 ○太田 衆一郎（東海旅客鉄道・上智大院） 正〔電〕 村井 敏昭（東海旅客鉄道）
正〔機〕 吉岡 博（東海旅客鉄道） 正〔機〕 曄道 佳明（上智大学）

Development of a test stand for magnetically levitated vehicle dynamics evaluation

Shuichiro OTA, Central Japan Railway Co. 2-1-85 Konan, Minato-ku, Tokyo / Sophia Univ.

Toshiaki MURAI, Central Japan Railway Co.

Hiroshi YOSHIOKA, Central Japan Railway Co.

Yoshiaki TERUMICHI, Sophia Univ.

Fundamental experiments on a test stand to examine the characteristics of magnetically levitated (maglev) vehicle dynamics were conducted. In the prototype test stand, an actual bogie with weights, which correspond to a car body, is magnetically suspended and vibrated by surrounding magnetic exciting coils. Vertical accelerations of the bogie and weights vibrated in the proposed way were compared with those of the moving vehicles to find similarities in a range of frequencies sensitive to ride quality.

Keywords : magnetic levitation, test stand, vehicle dynamics, ride comfort

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道（以下超電導リニア）は、車両に設置された超電導磁石と軌道（ガイドウェイと称するコンクリート製の構造物）に連続配置された地上コイル間の電磁作用によって、最高速度 500km/h での運行を実現する次世代高速鉄道システムである。超電導リニアの乗り心地特性は従来の鉄車輪方式とは大きく異なっており、そのために従来鉄道における既存の乗り心地向上策を適用することで得られる効果は限定的である。超電導リニアに適切な乗り心地向上策を別に確立する必要があると考えられる。

自動車や鉄車輪—レール方式鉄道においては、車両の走行状態を定置で再現できる台上試験機が乗り心地向上策評価のための有効なツールとして活用されている。超電導リニアにおいても、車両運動を評価できる定置試験装置を利用することができれば、乗り心地向上策の開発が促進されることは明らかである。

このような背景を踏まえ、磁気浮上式鉄道の車両運動（特に乗り心地）を評価できる試験装置のための基礎的な実験を行った。本論文では試験装置のシステム構成や電磁加振方法について論じ、その実験結果を示すことで、磁気浮上式鉄道の車両運動を適正に評価できる試験装置実現のための技術的見込みが得られたことを明らかにする。

2. 磁気浮上式鉄道の車両運動

2.1 浮上案内の原理

超電導リニアの超電導磁石と地上コイルの位置関係を図1に示す。超電導磁石を車両の側面に配置し、また、U字型断面のガイドウェイの側壁に地上コイルを敷設する側壁浮上方式の優位性が明らかになり、現在は側壁浮上方式を前提として検討が進められている。地上に敷設

された浮上案内コイルは8の字形の短絡コイルであり、上コイルと下コイルにおける超電導磁石の鎖交磁束が異なる場合、浮上案内コイルに誘導電流が流れて台車に上下力（浮上力）が発生する。また、左右の浮上案内コイルはヌルフラックスケーブルと呼ばれるケーブルで接続されており、車両が左右方向に変位した場合にも誘導電流が流れて、案内方向の力を発生させるものである。

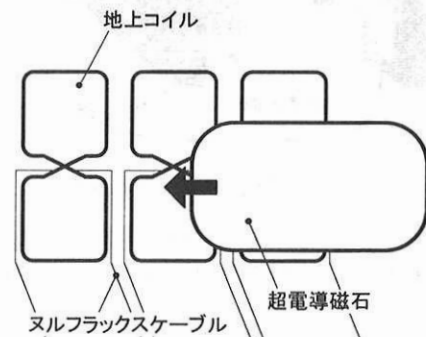


図1 超電導磁石と地上コイルの位置関係

2.2 車両運動の特徴

超電導リニアの車両運動の特徴は、次のような点が挙げられる。

- 鉄車輪方式の場合、連続して敷設されたレールの狂いが主要な加振源のひとつとされるが、超電導リニアの場合には、離散的に敷設された地上コイルの不整が該当する。ここで、乗り心地に強く関連する振動帯では、中間車両の車体の振動は、地上コイル不整に起因する成分が支配的である。⁽¹⁾
- 台車〜地上間の1次サスペンションにおけるダンピングが小さい。

- 左右方向と上下方向の振動特性を比較すると、上下方向については、1次サスペンションの共振周波数が乗り心地感度の高い周波数領域に含まれており、1次サスペンションのダンピングが小さいことも勘案すると、左右方向に対して上下方向の乗り心地改善が難しい。(2)(3)

3. 磁気支持電磁加振装置

3.1 システム構成

超電導リニアにおいて超電導磁石はキーテクノロジーであり、超電導磁石の各部の振動とその発熱、そして耐久性などの超電導磁石の評価を主要な目的とした試験装置は既に活用されている。この試験装置は、超電導磁石を評価するための高調波磁界を発生させることは当然ながら、村井・長谷川・柏木⁽⁴⁾の提案に基づき、走行時と同等な磁気ばねによって台車を磁気支持できる構成になっている。研究の第一段階として、今回は本装置を車両運動評価用に活用する。

装置の構成を図2に示す。本装置は、実際の台車に備えられた2組の超電導磁石を供試することが可能である。台車を挟み込むように加振コイルを配置し、その加振コイルに専用インバータから電流を供給する。また、連接台車方式であるために台車4隅に配置されている空気ばねの上部には枕木方向に2本の梁を配置し、この梁を地上構造物に固定したうえで空気ばねの内圧を高めれば、車体重量を模擬できる構成となっている。

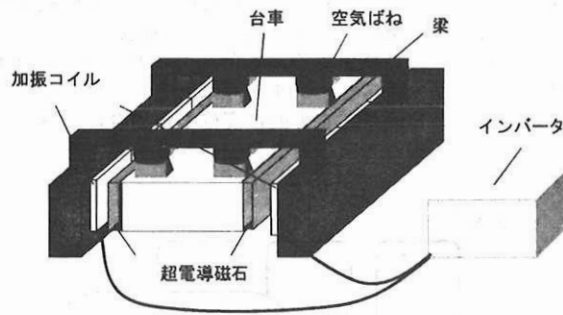


図2 磁気支持電磁加振装置

この試験装置において実走行時と同等の電磁ばねによって台車を磁気支持するためには、前後方向を除く台車の5自由度（上下・左右・ロール・ピッチ・ヨー）の変位をインバータ制御系にフィードバックする必要がある。今回は、台車4隅部直下の床面にレーザー式変位計を設置し、4隅部の上下変位を測定、また、片側加振コイル架台の上面にもレーザー式変位計を2つ設置し、台車前後の左右変位を測定する。これら6変位の情報に基づいて制御装置内で上述の台車5自由度の変位を演算、さらには次節で詳述するように地上コイル不整の影響を考慮したうえで、適切な制御電流値をインバータに指令している。

3.2 電磁加振方法

電磁加振にあたっては、実際に敷設されている地上コイルの不整を測量したデータを入力することで、車両が速度500km/hで走行する状態を再現する。ここで、地上コイル不整が車両運動に与える影響を解析的に明らかにしたうえで、その結果に基づいて測量したデータを適切に処理しており、次項以降にその詳細をまとめる。

3.2.1 地上コイル不整

今回検討の対象とする地上コイル不整は、コイル高低狂い δ_z 、コイル通り狂い δ_y 、コイル軌間狂い δ_g 、コイル水準狂い δ_ℓ の4種類とする。

- コイル高低狂いは、8の字形コイル中心の基準高さに対する上下方向の不整と定義する。右側高低狂いと左側高低狂いを区別して測定可能であり、その平均値をコイル高低狂いとする。
- コイル通り狂いは、8の字形コイル中心の基準位置に対する左右方向の不整と定義する。同じく右側通り狂いと左側通り狂いを区別して測定可能であり、その平均値をコイル通り狂いとする。
- コイル軌間狂いは、右側8の字形コイル中心と左側8の字形コイル中心間距離の、基準長さからの誤差と定義する。
- コイル水準狂いは、右側8の字形コイル中心高さと左側8の字形コイル中心高さの差と定義する。

3.2.2 地上コイル不整が車両運動に与える影響の解析

前節に示した4種類の地上コイル不整が車両運動に与える影響を、数値計算によって明らかにする。

計算の第一段階として、地上コイルに不整を設定しない際の静的なつり合い位置を求め、つり合い位置における台車電磁力 F_0 、電磁モーメント N_0 を求める。次に、すべての地上コイルに同じ不整量を与えたガイドウェイの中を、台車がつり合い位置を変えずに走行した際の台車電磁力 F_d 、電磁モーメント N_d を求め、次式で表わされるその差を評価する。

$$\Delta F_d = F_d - F_0 \quad (1)$$

$$\Delta N_d = N_d - N_0 \quad (2)$$

計算結果を表1に示す。表1において有意な値を得る箇所は f または n 、ほとんど0である箇所は0で示している。ここで、進行方向にX軸、進行方向左手にY軸、上方向にZ軸としている。本表により、台車の左右力とロールモーメントに影響を与える地上コイル不整は通り狂いと水準狂い、台車の上下力に影響を与える不整は高低狂いと軌間狂いであることが分かる。一方で、今回検討した地上コイル不整の範囲では、台車の前後力、ピッチモーメント、ヨーモーメントはほとんど影響を受けない。

表1 数値計算結果

	ΔF_{dx} (N/m)	ΔF_{dy} (N/m)	ΔF_{dz} (N/m)	ΔN_{dx} (Nm/m)	ΔN_{dy} (Nm/m)	ΔN_{dz} (Nm/m)
δ_z	0	0	f_{zdz}	0	0	0
δ_y	0	f_{ydy}	0	n_{ydx}	0	0
δ_g	0	0	f_{gdz}	0	0	0
δ_ℓ	0	$f_{\ell dy}$	0	$n_{\ell dx}$	0	0

いま、コイル高低狂い δ_z 、コイル通り狂い δ_y 、コイル軌間狂い δ_g 、コイル水準狂い δ_ℓ の地上コイル不整が存在するガイドウェイを仮定すると、台車に作用する左右電磁力および上下電磁力の変動分は、次式で表わされる。

$$\Delta F_{dy} = f_{ydy}\delta_y + f_{\ell dy}\delta_\ell \quad (3)$$

$$\Delta F_{dz} = f_{zdz}\delta_z + f_{gdz}\delta_g \quad (4)$$

ここで、右側のコイル高低狂い δ_{z1} と左側のコイル高低狂

い δ_{z2} を区別して考慮する場合には、その対称性から上下電磁力の変動分は式(5)で表される。

$$\Delta F_{dz} = \frac{f_{zdz}}{2} \delta_{z1} + \frac{f_{zdz}}{2} \delta_{z2} + f_{gz} \delta_g \quad (5)$$

3.2.3 等価左右狂いと等価上下狂い

前項に示した地上コイル不整が車両運動に与える影響を定置電磁加振試験時に考慮するために、等価左右狂い・等価上下狂いの考え方を導入する。いま、式(3)に示した左右電磁力の変動分と等価な左右電磁力を与える左右狂いを等価左右狂い δ_{yeq} 、式(5)に示した上下電磁力の変動分と等価な上下電磁力を与える上下狂いを等価上下狂い δ_{zeq} と定義すると、それぞれは次式で与えられる。

$$\delta_{yeq} = \delta_y + \frac{f_{edy}}{f_{ydy}} \delta_\ell \quad (6)$$

$$\delta_{z1eq} = \delta_{z1} + \frac{f_{gz}}{f_{zdz}} \delta_g \quad (7)$$

$$\delta_{z2eq} = \delta_{z2} + \frac{f_{gz}}{f_{zdz}} \delta_g \quad (8)$$

現車走行試験用に敷設された実験線において実際に測量された地上コイル不整について、式(6)、(7)の処理によって求めた等価上下狂いと等価左右狂いの空間周波数に対するスペクトルを図3に示す。(スペクトルの最大値で正規化している。)なお、空間周波数約0.08(1/m)にて等価上下狂いに顕著な卓越がみられるが、これは、12.6mの側壁ユニット長⁽⁵⁾に起因している。

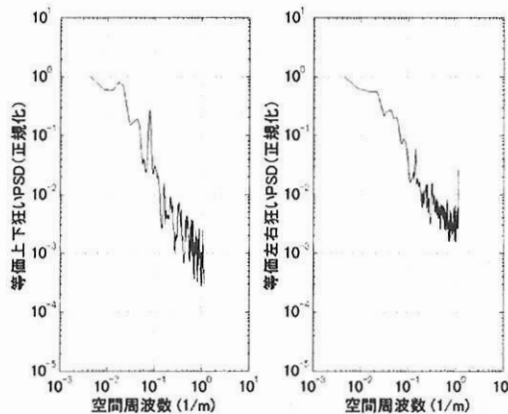


図3 等価狂いのスペクトル

3.2.4 地上コイル不整入力方法

電磁加振にあたっては、運動を再現する区間の4種類の地上コイル不整量を測定し、式(6)~(8)に示した等価上下狂いと等価左右狂いをあらかじめ計算、時系列データのテーブルとして制御装置内に準備する。電磁加振によって運動を再現する際には、次の手順を踏む。

1. 計測された台車4隅の上下変位、前後の左右変位に、該当する等価狂いを制御装置内で順次加算する。このとき、超電導磁石長に亘って等価狂い量を移動平均処理し、また、進行方向前側と後側では影響を受ける地上コイルの範囲が異なるので、その点も考慮する。
2. 等価上下狂いを加算した台車4隅の上下変位に基づいて台車の上下変位・ピッチ角・ロール角を、等価左右狂いを加算した台車前後の左右変位に基づいて台車の左右変位・ヨー角を演算する。

3. 演算された台車の5自由度の変位量の情報から、文献⁽⁴⁾の理論に基づいてインバータに制御電流値を指令する。

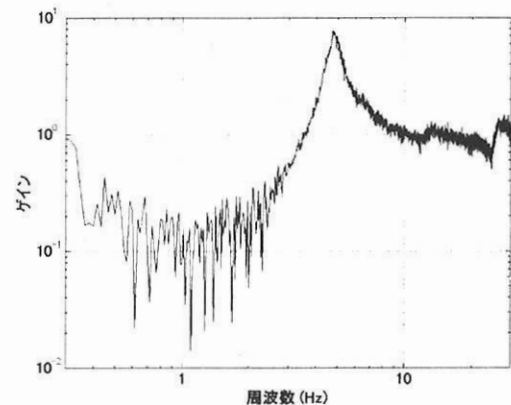
これら一連の処理によって、地上コイル不整から受ける電磁力の変動分と等価な台車上下力・左右力を再現しており、すなわち、本装置における台車の運動は、実際に走行している台車が地上コイル不整によって加振されている運動と、動力学的にほぼ一致する。

4. 磁気支持電磁加振結果

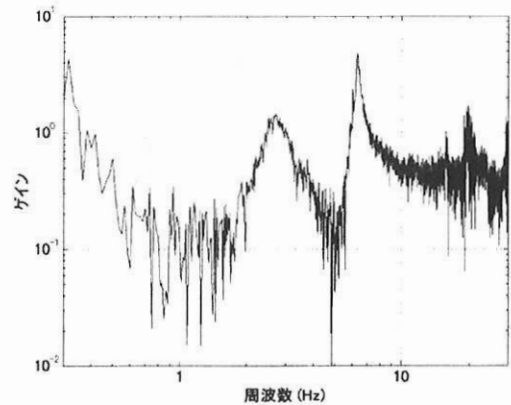
4.1 台車単体磁気支持電磁加振試験

試験の第一段階として、空気ばね上部の梁を地上構造物に固定して台車運動のみを許容した状態において、磁気支持時の電磁ばねを確認するための試験を実施した。台車上下(左右)変位の計測に、制御装置内で振幅1mmの周波数掃引正弦波を加算する掃引正弦波加振試験である。

変位を入力、振動加速度を出力とした周波数応答関数のゲインを図4に示す。上下方向については、4.8Hzに共振点が存在しており、これは、4~5Hzとされる1次支持系の固有振動数⁽³⁾に相当している。左右方向については、2.7Hzと6.3Hzに共振点が存在している。渡邊・吉岡・鈴木・速竹・永井⁽²⁾の理論解析例では、台車の上心ロール運動が2.561Hz、下心ロール運動が6.429Hzで卓越することが示されているが、今回の試験結果と整合するものである。



(a) 上下方向



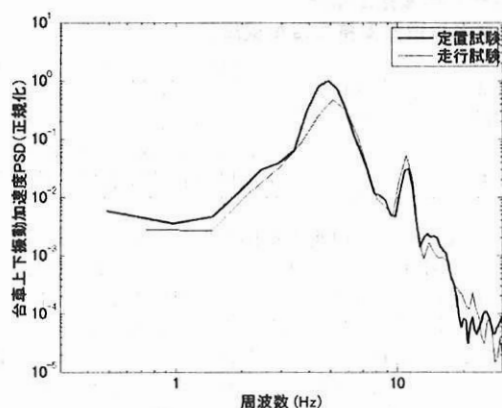
(b) 左右方向

図4 台車単体掃引正弦波加振試験結果

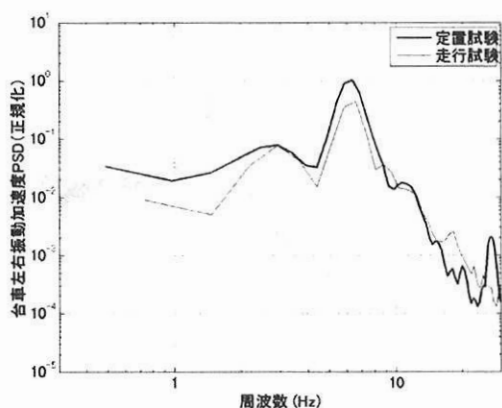
以上より、上下方向・左右方向ともに、試験装置での台車運動と走行中の台車運動の共振周波数が一致しており、試験装置においても走行時と同等な電磁ばねによって磁気支持できることを、実験によって確認した。

4.2 治具搭載磁気支持電磁加振試験

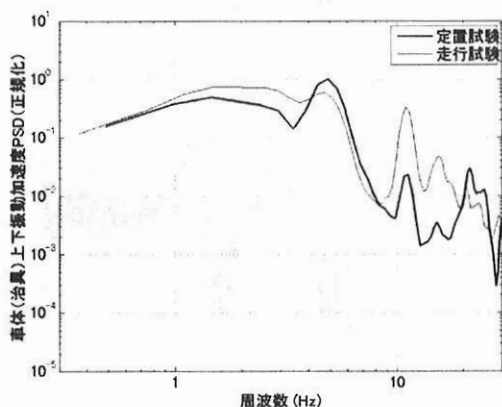
次に、空気ばね上の梁と地上構造物を分離し、さらには2本の梁の上部にコンクリート製のウェイトを渡して試験を実施した。この治具（梁とウェイトを併せて治具と称す）は、車体に見立てたものである。



(a) 台車上下方向



(b) 台車左右方向



(c) 車体（治具）上下方向

図5 治具搭載磁気支持電磁加振結果

実験線におけるトンネル区間約 700m の地上コイル不整の測量結果を利用して、前章で示した方法により電磁加振した結果を図5に示す。図は、定置試験における台車の上下・左右振動加速度、および治具の上下振動加速度のパワースペクトルを、実際の車両が速度 500km/h で同区間を走行した際のスペクトルと比較している。（いずれのグラフも、定置試験装置におけるスペクトルの最大値で正規化している。）

台車については、定置試験装置における台車の運動の方が大きく発生する傾向にあるが、共振の周波数や鋭さにおいて、両者は精度よく一致している。すなわち、定置試験装置においても、速度 500km/h 走行時の台車運動をほぼ再現できたといえる。

車体（治具）については、1~2Hz 付近の2次支持系の固有振動数、および 4~5Hz 付近の1次支持系の固有振動数での振動の卓越状況が一致している。10Hz 以上の周波数領域においては顕著な差が認められるが、治具を用いた今回の試験では、実際の車両における構体の弾性振動を再現できないためである。なお、上下方向は、周波数 4~8Hz の振動が乗り心地に最も影響を与えるとされており、その点も勘案すると、今回のような簡易な治具によってでも、乗り心地感度の高い周波数範囲では車体の上下振動を再現できたといえる。

5. 終わりに

磁気浮上式鉄道の車両運動（特に乗り心地）を評価する試験装置のための、基礎的な実験を行った。車体に見立てた治具（ウェイト）を磁気支持した台車の上に設置した状態で、電磁加振するものである。

定置電磁加振時の振動と実際の車両が走行した際の振動を比較したところ、台車の運動はほぼ一致していることを確認、本手法の妥当性を実験によって示すことができた。また、車体に見立てて導入した今回の治具は、乗り心地改善が難しいと考えられている上下方向については、乗り心地感度の高い周波数帯でほぼ同等であることを確認した。

磁気浮上式鉄道の車両運動を適正に評価できる定置試験装置実現のための技術的見込みは得られたと考えられる。

参考文献

- 1) 吉岡博：磁気浮上式車両の運動モデル，鉄道総研報告，2巻6号，1988
- 2) 渡邊健，吉岡博，鈴木江里光，遠竹隆行，永井正夫：超電導磁気浮上式鉄道車両の振動制御に関する研究（左右・ロール系の振動制御），日本機械学会論文集（C編），71巻701号，pp.114-121，2005
- 3) 渡邊健，吉岡博，鈴木江里光，遠竹隆行，永井正夫：超電導磁気浮上式鉄道車両の振動制御に関する研究（上下・ピッチ系の振動制御），日本機械学会論文集（C編），71巻701号，pp.122-128，2005
- 4) 村井敏昭，長谷川均，柏木隆行：超電導磁気浮上式鉄道における磁気支持電磁加振装置の設計，電気学会論文誌D，123巻9号，pp.1050-1056，2003
- 5) 古川敦，橋本渉一：ガイドウェイ狂いのパワースペクトル密度と乗り心地レベル，鉄道総研報告，7巻2号，1993