

希土類系高温超電導磁石の搭載を想定した車両運動特性

渡邊 健* 鈴木 江里光*
米津 武則* 笹川 卓** 星野 宏則***

Characteristics of Maglev Vehicle Dynamics Considering Cars with Onboard REBCO SCMs

Ken WATANABE Erimitsu SUZUKI

Takenori YONEZU Takashi SASAKAWA Hironori HOSHINO

Onboard REBCO (rare-earth-element-based high temperature superconductor) SCMs (superconducting magnets) for Maglev vehicles are being developed, that do not require costly refrigerants such as liquid helium, since their operating temperature is higher than that of conventional SCMs. Their simplified refrigeration system results in reduced vehicle weight and makes it possible to reduce the gap between the SCM and guideway coils, which in turn can be expected to yield benefits such as improved electromagnetic force characteristics. And if the same electromagnetic characteristics as those of conventional SCMs are to be maintained, the energizing power of REBCO SCMs can be lowered, making it possible to reduce the magnetic fields and the weight of the magnetic shielding materials in the car body.

キーワード：浮上式鉄道，高温超電導磁石，電磁力，車両運動力学

1. はじめに

希土類系高温超電導線材を用いた浮上式鉄道車両用超電導磁石（浮上式車両用 RE 系 SCM）の研究開発を進めている¹⁾。RE 系 SCM については、運用温度の高温化により、液体ヘリウム等の冷媒が不要になるという大きな利点の他に、車両運動の観点からも、冷凍系の簡素化による軽量化²⁾や超電導コイル（SC コイル）中心～浮上案内コイル中心間のギャップ縮小、起磁力増加による電磁力特性の向上効果等が期待できる。浮上式車両に対するこれらの利点について、定量的に評価した。

2. RE 系 SCM について

鉄道総研で開発しているのは、イットリウム（Y）あるいはガドリニウム（Gd）等の希土類元素（RE）を主成分とした RE-Ba₂Cu₃O_y（REBCO）線材を用いた RE 系 SCM で、定常時の運用温度は従来 SCM の 4K 程度に対し 40 K 程度を目指している³⁾。現在、車載用実サイズの SC コイルを製作し、基本性能を確認している段階である。RE 系 SCM 車載の利点を図 1 および以下にまとめる。

- (1) 運用温度の高温化で可能になった伝導冷却により、液体ヘリウムや液体窒素等の冷媒が不要。
- (2) 伝導冷却による車載冷凍機の小型化に伴い、消費電力低減・メンテナンス周期延伸が可能。
- (3) 冷媒配管・輻射シールド板省略による磁石内部の断熱構造の簡素化、それに伴う台車重量の軽量化が可能。
- (4) 運用温度の高温化による SC コイルの熱的安定性向上、起磁力増大（＝電磁力特性向上）が可能。
- (5) 輻射シールド板等の省略による SC コイル中心～地上コイル中心間空隙（ギャップ）縮小に伴う、
 - ・同一の起磁力では、電磁力特性の向上。
 - ・同一の電磁力特性では、起磁力低減による磁気シ-

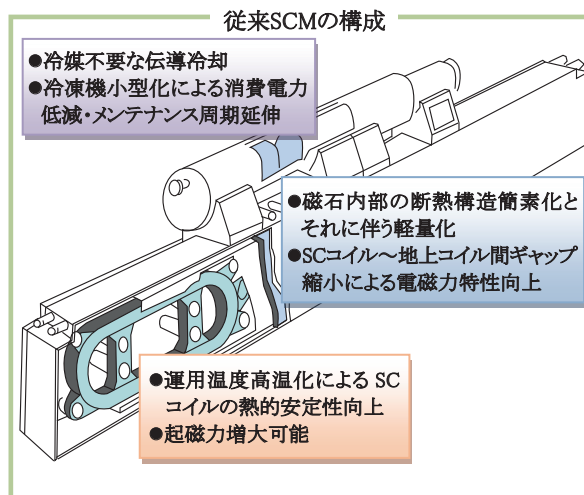


図 1 従来 SCM 構成に対する RE 系 SCM の利点

* 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 電磁システム研究室
(現 情報管理部)

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

ルド重量低減。

その他、RE系SCMでは、永久電流モードでの運用ではなく、常時通電を想定しているため³⁾、励磁電源を車載することが必要となる。この車載の励磁電源を活用すれば、従来不可能だったSCMの起磁力を変化させることが可能となり、浮上・案内力を制御することで車両運動特性向上も期待できると考えている⁴⁾。

3. RE系SCM車載の検討条件

RE系SCMを車載した場合を想定し、計算機シミュレーションにより、電磁力特性と車両運動特性を求めて、これらの向上効果を評価した。ここで、現時点では車載用RE系SCMの詳細仕様は未定のため、従来SCMをそのまま置換することを前提とし、以下を仮定した⁵⁾。

- ・ 冷凍系の簡素化による台車重量軽減量は1tとする。
- ・ 断熱構造の簡素化によるSCコイル～浮上案内コイル中心間ギャップの縮小量は最大25mmとする(160～185mm)。
- ・ 起磁力は±100kAの増減を可能とする(600～800kA)。

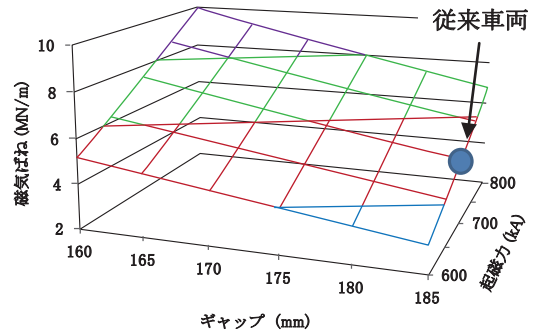
今回の検討に当たり、基準とした車両、SCコイルの諸元を表1に示す^{6)～9)}。

表1 基準とした車両、SCコイルの諸元

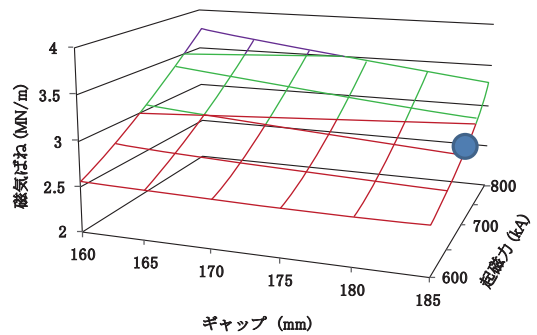
諸元	値
車体重量	14 t
台車重量	6 t
車体長	24.3 m
SCコイルピッチ	1.35 m
SCコイル幅	1.07 m
SCコイル高さ	0.5 m
起磁力	700 kA
ギャップ	185 mm

4. シミュレーション結果

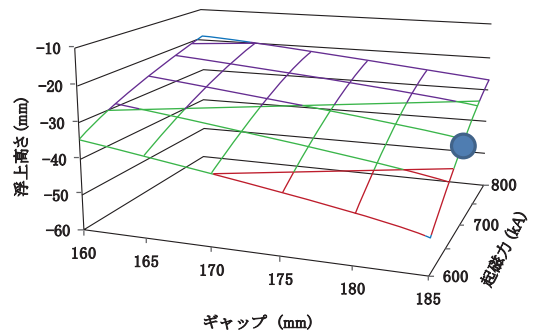
RE系SCMの搭載を想定した車両に対し、起磁力の増減・ギャップを縮小した場合について、従来車両との電磁力特性を比較した。電磁力の計算は文献(10)、(11)を基に定電流モードで行い、台車は車体1台分の荷重を負担するものとした。また、前述の通り、起磁力は±100kA増減させた600～800kAの範囲、ギャップは最大25mm縮小させた160～185mmの範囲で変化させた。また、車両重量は台車を1t軽量化して19tとし、走行速度は一定(500km/h)とした。



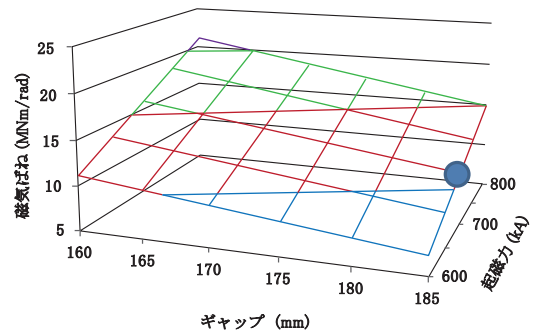
(a) 上下磁気ばね特性



(b) 左右磁気ばね特性



(c) 浮上高さ特性



(d) ロール磁気ばね特性

図2 RE系SCM車載時の電磁力特性 (速度500km/h)

図2に電磁力特性の計算結果を示す。同図(a)に上下磁気ばね特性、同図(b)に左右磁気ばね特性、同図(c)に浮上高さ特性、同図(d)にロール磁気ばね特性を示す。ここで、浮上高さ特性は、SCMの高さ中心～浮上案内コイルの高さ中心間の相対距離とした。比較のため、車両重量20t、起磁力700kA、ギャップ185mmの車両(以下、従来車両)の特性を各図中○印で示した。

図2(a),(d)より、起磁力・ギャップの変化に対し、上下およびロールの磁気ばねについて、ばね定数はほぼ線形に変化することが分かる。例えば、上下ばねでは、従来車両に対し、ギャップ25mm縮小・起磁力100kA増でばね定数は約2倍、ギャップ縮小なし・起磁力100kA減で約35%減となった。一方、ギャップ25mm縮小・起磁力100kA減で、ばね定数は約5%増となり、従来車両とほぼ同一の電磁力特性が得られることが分かる。図2(b)より、左右磁気ばねに関しても、概ね線形の特性を有するが、起磁力100kA減・ギャップ0～10mm縮小の条件では、ギャップが広い方がばね定数が若干大きくなり、他とは異なる傾向が見られる。これは、図3に示す通り、SCM～浮上案内コイル間のギャップが広がることで、浮上力が低下して浮上高さが下がって沈み込み、それに合わせ、左右両側の浮上案内コイルの浮上電流が増加し、その分が案内電流に加わることで左右力の増加に寄与しているものと考えられる¹²⁾。これについては、図2(c)の浮上高さ特性において、起磁力100kA減のギャップ0～10mm縮小の条件で、ギャップが広がるに従い、浮上高さが急激に減少していることから推定できる。

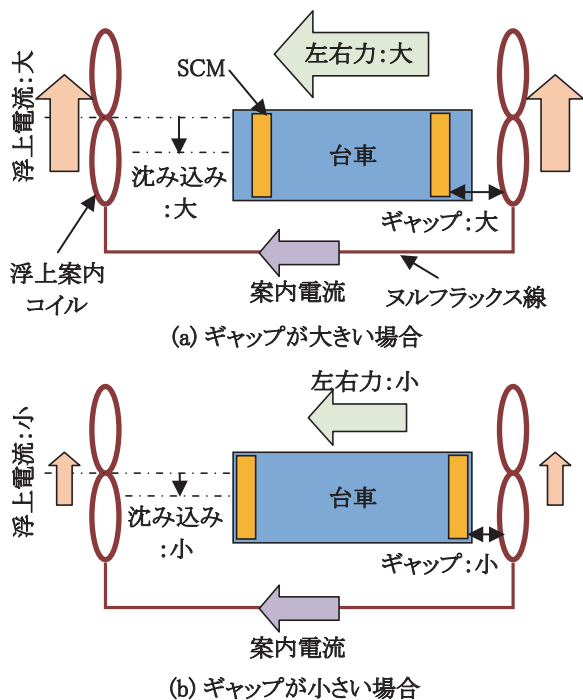


図3 ギャップと左右磁気ばねの関係

5. 起磁力低減の可能性

5.1 起磁力低減

前述の通り、RE系SCMを車載することで、ギャップ縮小や起磁力増加が可能となり、電磁力特性の向上が期待できる。ここで、起磁力を増加させると、例えば、浮上力の増大により、浮上開始速度低速化によるタイヤ摩耗低減や、将来的な車体重量増への対応も可能となる。一方、従来SCMと同等の電磁力特性維持を前提とすると、ギャップ縮小等により起磁力の低減が可能となり、磁気シールドの軽量化¹³⁾やSCコイルの巻数減によるコスト低減が期待できる。このように起磁力を低減させることは車両へもたらす利点が多いため、この可能性の検討を行った。

5.2 起磁力低減時の推力特性

従来車両と同等の電磁力特性を得ることを前提とすると、100kA程度の起磁力低減が可能となる。しかしながら、起磁力を下げると、推進コイル表面を鎖交する磁束が減少するため、リニアモータとしての効率が低くなり、推力が低下する。そこで、推進電流一定の条件で起磁力を変化させ、従来車両に近い推力が得られる起磁力を求めた。ここで、RE系SCMの利点を最大限活かすため、ギャップは25mm縮小した160mm、車両重量は19tとして、起磁力を変化させて推力を算出した。推力の計算に用いた諸元⁸⁾¹⁴⁾を表2に、計算結果を図4に示す。同図には、比較のため、従来車両の推力も示した。図4より、起磁力を100kA増の800kAとした場合には、従来車両に比べて推力は約30%向上し、100kA減の600kAとした場合には約5%低下することが分かる。また、従来車両と同等の推力を得ようとした場合、起磁力は70kA減の630kAとなり、従来車両よりも10%の起磁力低減が可能となることが分かった。

表2 推力計算の諸元

諸元	値
推進電流 (rms)	1015 A
推進コイルピッチ	0.9 m
推進コイル高さ	0.6 m

5.3 起磁力低減時の電磁力特性

(1) 電磁力特性

起磁力低減時の電磁力特性を求め、従来車両と比較した。前項で求めた630kAの起磁力に対し、磁気ばね・浮上高さの速度特性を求めた。結果を図5に示す。同図(a)に上下・左右の磁気ばね特性、同図(b)に浮上高さ特性、同図(c)にロールばね特性、同図(d)に左右

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

等価・ロール等価ばね特性を示す。比較のため、これらの図には従来車両の特性も示した。以下、起磁力を 630 kA に下げた車両を低起磁力車両と呼ぶ。図 5 (a) より、速度 500 km/h において、低起磁力車両では、上下ばね定数は従来車両に比べて約 20% 向上し、左右ばね定数は約 7% 低下する。左右ばね定数の低下は、前述の通り、浮上効率が上がり、浮上案内コイルの浮上電流が小さくなったためと考えられる。これについては、同図 (b) の浮上高さ特性でも、低起磁力車両の方が浮上高さが高いことから確認できる。また、同図 (c) より、ロールばね定数は、速度 500 km/h 時に低起磁力車両の方が約 20% 向上していることが分かる。

(2) 低速浮上安定性

浮上式車両の磁気ばねには連成する特性があり、例えば、車両が左右方向に変位した場合、左右方向の復元力以外にも、ロールの復元モーメントも発生する。連成の影響は低速域でより顕著になるため、低速浮上時の走行安定性の検討では、通常左右やロールのばねに加え、連成の影響も考慮した左右等価ばね定数またはロール等価ばね定数により評価する。これら等価ばね定数が 0 になると、静的に不安定となるため、低速浮上時の限界速度を見積もることが可能となる^{11) 15)}。この低速浮上時の走行安定性について、左右等価ばね・ロール等価ばね特性により確認した結果を図 5 (d) に示す。同図より、今回計算した最低速度である 105 km/h において、低起磁力車両の方が、左右等価ばね定数は約 20%、ロール等価ばね定数は約 60% 大きくなっており、低速時の浮上安定性は低起磁力車両の方が優れていることが分かる。また、左右等価ばね定数 1MN/m 以上、ロール等価ばね定数 1MNm/rad 以上を浮上走行が可能な条件と仮定すると¹⁶⁾、低起磁力車両では 100 km/h 程度でも浮上走行が可能であることが分かる。

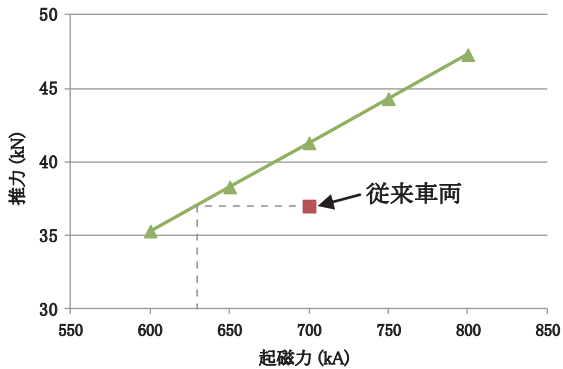
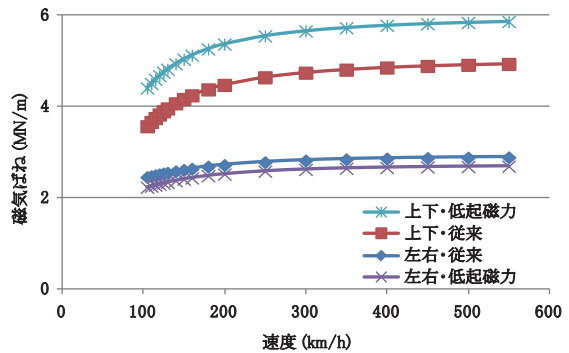
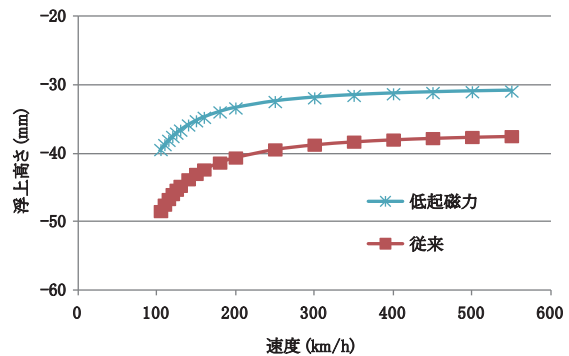


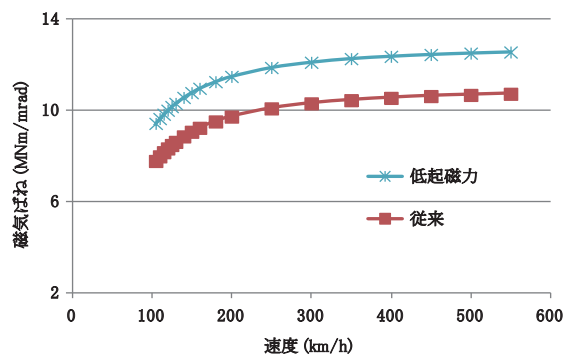
図4 起磁力と推力の関係



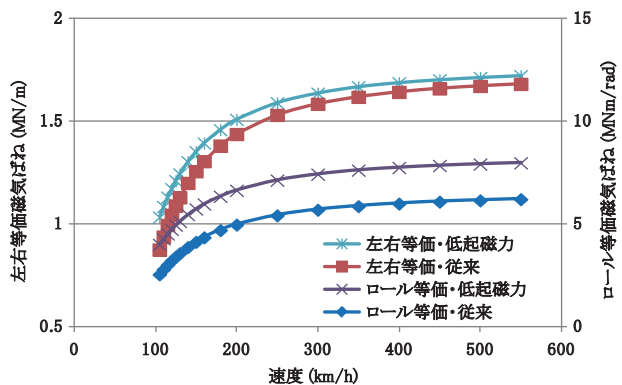
(a) 上下・左右磁気ばね特性



(b) 浮上高さ特性



(c) ロール磁気ばね特性



(d) 左右等価・ロール等価磁気ばね特性

図5 起磁力低減時の電磁力特性

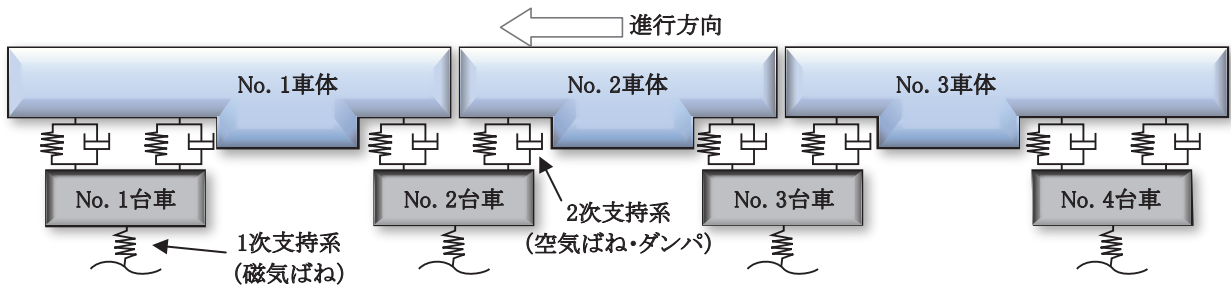


図6 3両編成車両モデル

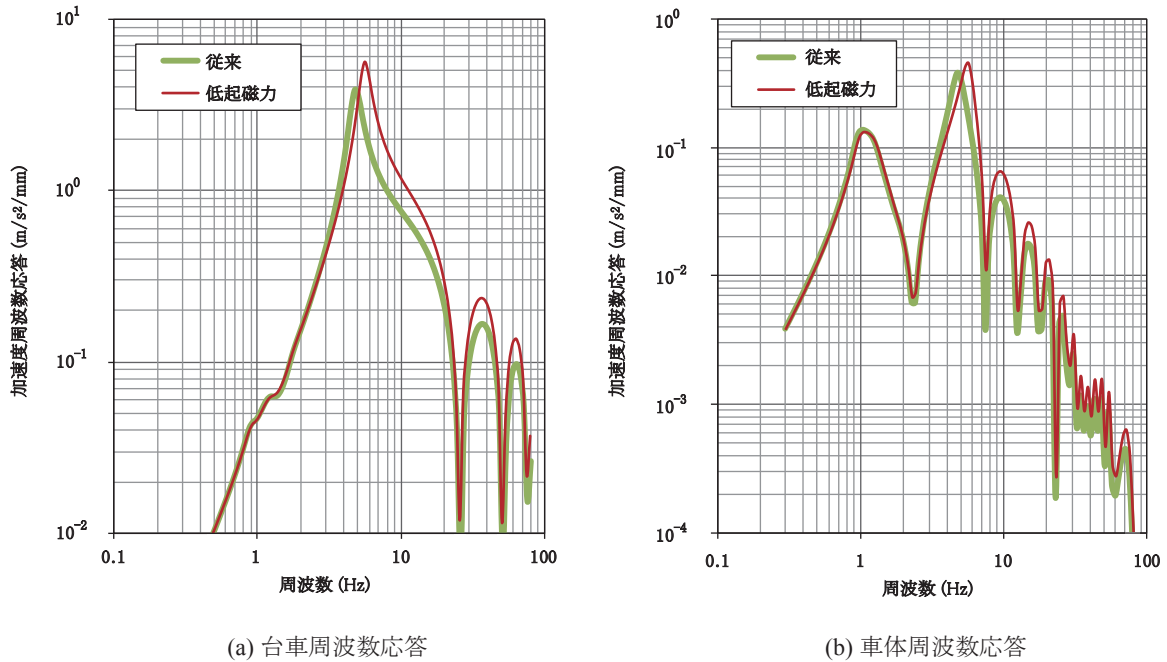


図7 加速度周波数応答特性の比較 (速度 500 km/h)

5.4 起磁力低減時の車両運動特性

(1) 車両運動モデル

起磁力低減時の車両運動特性を把握するため、3車体・4台車から構成される上下・ピッチ系の剛体車両運動モデルを用いて、車体および台車の上下加速度周波数応答を算出した⁶⁾。車両運動モデルの概要を図6に、計算諸元^{9) 17) 18)}を表3に示す。このモデルでは、台車～地上間の1次支持系は、前出の磁気ばねから構成され、減衰要素はないものとした。実際の磁気ばねは、SCM全長にわたり分布して作用するものと考えられるが、今回は台車重心位置に集中的に作用する等価な線形ばねとして表現し、浮上式車両に特有な上下・ピッチの磁気ばねの連成も考慮した⁶⁾。また、車両は連接構造で、車体～台車間の2次支持系については、台車4隅の上下空気ばね・上下ダンパで車体と結合されるものとした。空気ばねには補助空気溜の絞り効果が得られるモデルを用いた¹⁹⁾。車体・台車加速度の周波数応答は、上下方向の振幅1mmの正弦波外乱に対する加速度応答として算出した。

表3 車両運動計算の諸元

諸元	値
車体長さ	24.3 m
台車長さ	5.4 m
上下空気ばね定数 (1個当たり)	19.6 kN/m
上下ダンパ減衰係数 (1個当たり)	5 kN・s/m

(2) 加速度周波数応答による比較

図7に、前述した車両運動モデルによる周波数応答計算結果を示す。同図(a)には、No.2台車重心位置の上下加速度、(b)にはNo.2車体重心位置の上下加速度の周波数応答を示す。これらの図では、低起磁力車両とは、台車重量1t軽量化、ギャップ25mm縮小、起磁力70kA減としたものを示す。同図(a)、(b)の5～6Hz付近の加速度ピークは、1次支持系の磁気ばねの固有振動数に起因するものである。また、同図(b)の1Hz付近の加速度ピークは、2次支持系の空気ばねの固有振動数に起因するものである。同図(a)より、台車振動加

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

速度において、1次支持系に起因する加速度ピークは、従来車両に比べ、低起磁力車両では約45%増加したことが分かる。また、同図(b)より、車体振動加速度において、2次支持系に起因する加速度ピークには変化はないが、1次支持系に起因する加速度ピークは、従来車両に比べ、低起磁力車両では約40%増加したことが分かる。その他、台車・車体とも、1次支持系に起因するピーク周波数以上の領域でも、低起磁力車両の加速度は大きくなっていることが分かる。これらについては、前述の通り、低起磁力車両の方が上下磁気ばね定数が大きくなっていることが原因と考えられる。

(3) 乗心地レベルによる比較

実走行条件に近づけるため、模擬ガイドウェイ高低変位 PSD を用いて乗心地レベルを算出し、起磁力低減効果を比較した。高低変位の PSD 形状は文献(6)を参考にし、前項で求めた周波数応答の自乗を乗じて算出した車体加速度 PSD から、乗心地レベルを求めた。乗心地レベルの比較では、従来車両に比べ、低起磁力車両では約0.2 dB増加したが、ほとんど誤差範囲と考えられる。前述の通り、周波数応答による加速度ピークは増加しているものの、乗心地レベル算出に用いる周波数重み付けフィルタの形状で影響が小さくなったものと考えられる。

6. まとめ

浮上式車両用に開発を進めている RE 系 SCM の車載を想定し、電磁力特性の算出により、車両へもたらされる利点について定量的に評価した。また、起磁力を低減させた場合の電磁力特性、車両運動特性を求め、従来車両と同一の特性を維持しつつ、起磁力が低減可能であることを示した。

文 献

1) 水野克俊, 小方正文: リニア用高温超電導磁石を開発する, RRR, Vol. 70, No. 10, pp. 8-11, 2013
 2) 長嶋賢, 小方正文, 水野克俊, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓: 希土類系高温超電導線材を用いた浮上式鉄道用超電導磁石の構成, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 3, pp. 17-22, 2011
 3) 水野克俊, 小方正文, 長谷川均: 浮上式鉄道用の希土類系高温超電導磁石の熱特性評価, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 9, pp. 5-10, 2014
 4) 長谷川均, 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓, 岩松勝, 長嶋賢:

磁気浮上式列車の超電導磁石の起磁力制御システム, 特開 2012-44774, 2012
 5) 渡邊健, 星野宏則, 鈴木江里光, 米津武則, 笹川卓: RE 系 SCM を搭載した浮上式車両の電磁力特性の基礎検討, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No. 14A18, pp. 67-68, 2015
 6) 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, Vol. 71, No. 701, pp. 122-128, 2005
 7) 阿座上雅芳: 山梨実験線第一編成車両用台車の開発, 鉄道総研報告, Vol. 10, No. 1, pp. 11-16, 1996
 8) 村井敏昭: 推進浮上案内を兼用するリニア同期モータの特性, 鉄道総研報告, Vol. 10, No. 1, pp. 35-40, 1996
 9) 井上明彦, 吉村正文, 阿座上雅芳, 大島浩: 山梨リニア実験線第二編成車両の概要, 平成 9 年鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No. 3302, pp. 573-576, 1997
 10) 吉岡博: 磁気浮上車両の運動モデル, 鉄道総研報告, Vol. 2, No. 6, pp. 17-22, 1988
 11) 日本機械学会編: 車両システムのダイナミクスと制御, 養賢堂, pp. 160-172, 1999
 12) 藤原俊輔: 側壁に浮上コイルを配置する超電導磁気浮上方式に関する研究, 東京大学学位論文, pp. 40-57, 1992
 13) 笹川卓, 田川直人, 戸来年樹: 浮上式鉄道用直流磁気シールド特性の改善, 鉄道総研報告, Vol. 19, No. 6, pp. 41-44, 2005
 14) 古賀俊作, 北野淳一, 中島強: 山梨リニア実験線における速度起電力位相同期方式を用いた自制制御走行試験結果, 電気学会論文誌, Vol. 120-D, No. 7, pp. 934-939, 2000
 15) 吉岡博, 渡邊健: 側壁浮上システムにおける車両運動特性, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 10, pp. 29-34, 1994
 16) 村井敏昭, 藤原俊輔: 最適化手法を用いた超電導磁気浮上方式におけるコイル諸元の設計, 電気学会論文誌, Vol. 117-D, No. 7, pp. 905-911, 1997
 17) 阿座上雅芳, 滝沢秀行: 山梨実験線用車両を解剖する - 3. 台車と構成機器 -, RRR, Vol. 52, No. 10, pp. 10-11, 1995
 18) 星野宏則, 鈴木江里光, 渡邊健: 1次・2次支持系アクティブ制御による浮上式車両の振動低減, 鉄道総研報告, Vol. 21, No. 9, pp. 5-10, 2007
 19) 小柳志郎: 空気ばね車両の上下振動絶縁法 - 絞り流量特性線形化の効果 -, 鉄道技術研究報告, No. 1137, pp. 6-22, 1980