3705 車両・電磁力連成モデルによる超電導磁気浮上式鉄道車両の 大変位挙動解析の基礎検討

Æ	[機]	[電]	〇米津	武則	(鉄道総研)			星野	宏則	(鉄道総研)
	正	[機]	鈴木	江里光	(鉄道総研)	正	[機]	渡邉	健	(鉄道総研)

Fundamental Study for Dynamic Analysis of Superconducting Maglev Vehicles Moving with Large Displacements Using Co-simulation Models of Vehicle Dynamics and Electromagnetic Forces

Takenori YONEZU, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo Hironori HOSHINO, Railway Technical Research Institute Erimitsu SUZUKI, Railway Technical Research Institute Ken WATANABE, Railway Technical Research Institute

Computer simulations have been performed to study vehicle dynamics of superconducting Maglev vehicles for purposes such as of improving ride comfort. Recently, the authors have constructed new simulation models of Maglev vehicles to study non-linear dynamic motions of the vehicles moving with large displacements. The constructed models are co-simulation models of vehicle dynamics and electromagnetic forces. These models will be helpful in studying dynamic motions of the vehicles in case of accidents such as earthquakes or malfunctioning of Maglev vehicles.

Fundamental computer simulations have been performed to study vehicle dynamics of Maglev vehicles moving with large displacements using these models. This paper describes the results of these studies.

Keywords : superconducting Maglev, vehicle dynamics, co-simulation, large displacement, non-linear dynamic motions, air spring

1. はじめに

これまで,乗り心地向上のための振動制御手法の開発 等を目的として,超電導磁気浮上式鉄道(以下,浮上式 鉄道)の車両運動の計算機シミュレーションを行ってき た¹⁾²⁾.また,同時に,現車試験により,計算機シミュ レーションの妥当性検証等を行ってきた³⁾.

研究の次段階として,車両故障・地震時等の現車では 実験困難な大変位挙動の解明を目指し,大変位まで対応 が可能な浮上式鉄道車両運動解析モデル(以下,車両・ 電磁力連成モデル)を作成した⁴⁾⁵⁾⁶⁾.作成したモデルを 用いて大変位挙動解析の基礎検討を行ったが,本稿では その解析結果を述べる.

鉄車輪・レールによる一般的な鉄道(以下,在来方式 鉄道)の車両では,既にマルチボディダイナミクス

(MultiBody Dynamics; MBD)の手法を取り入れ,地震 時等の大変位挙動解析が行われている⁷⁾.しかし,浮上 式鉄道車両の大変位挙動解析を考えるにあたっては,在 来方式鉄道とは異なる,浮上式鉄道に特有な解析モデル が必要である.

在来方式鉄道車両と浮上式鉄道車両の支持系を図1に 示す.在来方式鉄道の1次支持系(台車枠〜軸箱間の支 持系)は、コイルばね等を用いた軸ばねから構成される のに対し、浮上式鉄道の1次支持系(台車〜ガイドウェ イ間の支持系)は、ガイドウェイ側壁に取り付けられた 浮上・案内用の地上コイルと車上の超電導磁石との電磁 気的な相互作用により発生する、非接触の磁気ばねから 構成される⁸⁾.





浮上式鉄道車両の大変位挙動解析においては、磁気ば ねの部分に相当する台車〜地上間の電磁力を計算するモ デル(以下,電磁力モデル)と、車体・台車,および車 体〜台車間支持系等から構成される車両モデルを連成さ せる必要がある.

浮上式鉄道において,車両の支持・案内は車上に搭載 した超電導磁石と地上側に敷設した浮上案内コイルとの 誘導作用によって行われる電磁誘導方式であり,車両の 推進は車上の超電導磁石を界磁とし,地上側に敷設した 推進コイルを電機子とする地上一次方式のリニア同期モ

[No. 12-79] 日本機械学会 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2012-12.5~7.東京]

ータである⁹¹⁰⁾. 浮上式鉄道車両の大変位挙動解析にお いては, 超電導磁石と地上コイルとの間に働く電磁力を モデル化し, 組み込む必要がある.

2. 車両・電磁力達成モデルの概要 2.1 概要

作成した車両・電磁力連成モデル^のにおける浮上式鉄 道車両の運動解析の流れを図2に示す.電磁力計算には, 浮上案内コイルから受ける電磁力を計算する浮上案内系 と,推進コイルから受ける電磁力を計算する推進系が存 在するが,初期検討として,浮上案内系の特性に焦点を 絞り,推進コイルから受ける電磁力に関しては,台車を 500km/h の一定速度で進行方向に移動させるモデルで近 似し,浮上案内コイルから受ける電磁力のみをモデルに 組み込んだ.

電磁力モデルでは、台車の位置・回転姿勢・速度・角 速度を外部入力として与え、台車の重心位置に作用する 電磁気的な力およびモーメントを求める.車両モデルで は、台車に作用する力およびモーメントを外部人力とし て与え、台車の位置・回転姿勢・速度・角速度を求める. このように、電磁力モデルと車両モデルを交互に用いる ことで、次の計算時間刻みへと順に解析を進めていく.

Co-simulation model of vehicle dynamics and electromagnetic forces





2.2 車両モデル

作成した車両モデル⁴⁾を図3に示す.車両モデルは汎 用のマルチボディダイナミクス解析ソフトウェア RecurDyn¹¹⁾を用いて作成した.この車両モデルは、4台 車・3車体から構成され、進行方向前から順に台車No.1 ~4、車体No.1~3と称する.車体No.1、No.3は先頭 車体および後尾車体、車体No.2は中間車体である.台 車、車体はいずれも剛体とした.全体座標系 xyz は図3 のように車両進行方向をx,鉛直上向き方向をzとし、z, y,xまわりの回転変位(回転順序もこの順番)をそれぞ れめ、θ、 ϕ とした. ϕ , θ , ϕ はオイラー角であり、 微小変位の範囲ではそれぞれヨーイング、ビッチング、 ローリングに相当する.また、結合要素として、車体~ 台車間は空気ばね、上下ダンパ、左右ダンパ、前後アン カを、車体~車体間は車体間連結器を用いた.今回は、 基礎検討として、空気ばね以外の各結合要素は線形なモ デル^{1)~3)}とした.なお、空気ばねの上下方向の等価モデ ルに関しては、図 4(a)のように絞りと補助空気溜の効果 を考慮したモデル³⁾を用いた.また、既報のモデル⁶⁾に 加えて、図 4(b)のように、空気ばねモデルに標準高さか ら上下方向に±30mm の位置¹²⁾にストッパを設け、車 体・台車の接触防止と、車体~台車間の上下変位拘束を 行った.



3. 車両・電磁力連成モデルによる解析結果 ~空気ば ねパンク時の車両運動の基礎検討~

大変位挙動解析の基礎検討として,速度 500km/h での 定常走行時に空気ばねがパンク¹³⁾した時における車両 の過渡的な運動に関する基礎検討を行った.

今回は,基礎検討として,空気ばねパンク時以降の空 気ばねのばね定数・減衰係数を共にゼロとし,空気ばね パンク前・後でばね定数・減衰係数をステップ状に変化 させた.

台車 No. 1~4 には各台車の前後左右に 4 個の空気ばね が設けられている.浮上式鉄道車両における空気ばねの 配置を図 5 に示す.本解析においては,進行方向前側を 前位,進行方向後側を後位とし,図 5 のように 1 位~4 位を定義する.

左右(1位と2位,あるいは3位と4位)の2個の空 気ばねは差圧弁を介してつながれているとする.すなわ ち,片側の空気ばねがパンクすると,パンクしていない 側の空気ばねの圧も低下する.本来は左右の空気ばねの 圧の低下に時間差が発生するが,今回は,基礎検討とし て,時間差は考慮しないこととし,左右同時にパンクす ることとした.



Fig. 5 Position of air springs on the Maglev bogie

今回は、台車 No. 2 の後位 2 個(3 位、4 位)の空気ば ねがパンクした場合(以下, Case 1)の車両の挙動を解 析した.

車体 No. 2 重心位置の上下変位の時刻歴波形を図 6(a) に、オイラー第2角 θ(微小変位の領域ではピッチング に相当)の回転変位の時刻歴波形を図 6(b)に示す.空気 ばねパンク時の時刻を0秒とした.なお、上下変位に関 しては、定常走行時の上下方向均衡位置を0mm、オイラ 一第2角回転変位に関しては、全体座標系と等しい回転 姿勢を0degとした.



図6より、上下変位とオイラー第2角回転変位には共 に約2Hz周期の振動成分が存在することがわかる.上下 変位とオイラー第2角回転変位の約2Hz周期の振動が逆 位相であることから、車体後位よりも車体前位の振動が 大きい.これは、車体 No.2の前位の空気ばねをパンク させたので、車体後位の空気ばね位置を中心に車体 No.2 がオイラー第2角の回転運動(以下、簡単のためピッチ ング運動と記す.)を行っているためであると考えられる.

台車 No. 2 重心位置の時刻歴波形を図7に示す.台車 No. 2 の上下変位とオイラー第2角回転変位は同位相で あることがわかる.これは、台車 No. 2 の後位の空気ば ねをパンクさせたので、台車前位を中心にピッチング運 動を行っているためであると考えられる.

また、台車 No. 1, 3, 4 重心位置の時刻歴波形を図8に 示す. 台車 No. 2 よりも変位・回転変位は小さいが、台 車の運動が発生しており、車体・台車のピッチング運動 が隣接する車体・台車に伝搬しているものと考えられる.



車体 No. 1~3 の重心位置における,空気ばねパンク後 2.5 秒間の上下変位およびオイラー第2角回転変位の最 大値および最小値を表1に示す.

表1より、車体 No. 2 の変位・回転変位が最も大きい ことがわかる.

台車 No. 2 の前位 2 個(1位, 2位)の空気ばねがパン クした場合(以下, Case 2)の車両の挙動を Case 1 の場 合と同様に解析した結果を表 2 に示す.

台車 No. 2 の前位 2 個(1 位,2 位)は車体 No. 1 の後 位に相当するので,上下変位,オイラー第 2 角回転変位 ともに車体 No. 1 重心位置が最も大きく変位・回転変位 する.ただし, Case 1 の車体 No. 2 の変位・回転変位よ りも小さい値である.これは,車体 No. 1 が先頭車体で あり,6 個の空気ばねのうちの2 個がパンクしても,残 りの4 個の空気ばねで支持されているためであると考え られる.

Table 1 Simulation results: Maximum and minimum values of displacements (Case 1)

(a) Vertical displacements

Car body	Maximum values [mm]	Minimum values [mm]
No. 1	1.0	-0.8
No. 2	0.0	-21.7
No. 3	0.2	-0.1

(b) Rotational displacements of second angle of Euler angles

Car body	Maximum values [deg]	Minimum values [deg]
No. 1	-0.03	-0.05
No. 2	0.16	-0.01
No. 3	0.06	0.06

Table 2 Simulation results: Maximum and minimum values of displacements (Case 2)

(a) Vortical dianagements

Car body	Maximum values [mm]	Minimum values [mm]
No. 1	0.0	-9.5
No. 2	0.5	-0.4
No. 3	0.0	0.0

(b) Rotational displacements

of second angle of Euler angles

Car body	Maximum values [deg]	Minimum values [deg]
No. 1	-0.04	-0.13
No. 2	0.01	0.00
No. 3	0.06	0.06

次に、パンクした空気ばねが上下方向に発生する力を 図9に示す。台車と車体が離れる方向に発生する力を正 としている. Case 1 においては、上下のストッパのいず れにも接触しない. 一方、Case 2 においては、上方のス トッパには接触しないものの、下方のストッパに接触し ていることがわかる. 車体 No. 1 重心位置における変位・ 回転変位は小さいが、車体 No. 1 の重心位置は前位寄り であり、空気ばね位置との距離が大きいため、空気ばね 位置での変位・回転変位の値は Case 1 に比べて大きくな ると考えられる.



4. おわりに

現車では実験困難な大変位挙動の計算機シミュレーシ

ョンによる解明を目指し,解析モデルの構築を行っている.大変位挙動解析の基礎検討結果の一例として,空気 ばねパンク時の車両の挙動解析結果を示した.本稿では 基礎的な解析を中心としたため,実際の空気ばねパンク 現象の精確な再現ができているわけではないが,定性的 な検討はできたと考えられる.

本稿で述べた解析結果から,解析モデルや計算条件の 詳細化¹⁴⁾により大変位挙動解析を行える見通しが得ら れた.今後は,実際の異常状態を精度良く再現できるよ うに,空気ばねモデルの詳細化や支持脚・案内脚モデル の追加等,解析モデルの改良を行う予定である.

参考文献

- 後邊健,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), Vol. 71, No. 701, pp. 114-121, 2005
- 渡邉健,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
- 渡邉健,星野宏則,浦部正男,鈴木江里光,吉岡博: 超電導磁気浮上式鉄道車両のシミュレーション検証, 第17回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講 演論文集,No.1PM10, pp.157-158, 2005
- 4) 米津武則,渡邉健,星野宏則,鈴木江里光:マルチ ボディダイナミクスを用いた超電導磁気浮上式鉄道 車両の運動解析,日本機械学会第20回交通・物流部 門大会講演論文集,No.1210, pp.105-106,2011
- 5) 米津武則,渡邉健,星野宏則,鈴木江里光,笹川卓: 超電導磁気浮上式鉄道の電磁力計算における数値誤 差に関する基礎検討,電気学会研究会資料, No. MAG-12-6/LD-12-6, pp. 29-34, 2012
- 米津武則,星野宏則,鈴木江里光,渡邉健:浮上式 車両の大変位挙動解析のための電磁力連成モデルの 構築,鉄道総研報告, Vol. 26, No. 5, pp. 5-10, 2012
- 7) 宮本岳史,石田弘明:鉄道車両の地震時走行安全性 向上策の検討,日本機械学会第16回交通・物流部門 大会講演論文集,No.1304, pp.319-322, 2007
- 8) 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
- 藤原俊輔,藤本健:浮上と案内を兼用する誘導反発 式磁気浮上の特性,電気学会論文誌 D, Vol. 112, No. 5, pp. 459-466, 1992
- 10) 村井敏昭:推進・浮上・案内・集電を兼用する超電 導磁気浮上系に関する研究,鉄道総研報告特別第12 号,1997
- 後藤雅和:有限要素法解析を融合した機構解析ソフトウェア RecurDyn と実験検証の取り組み、日本機 械学会誌, Vol. 112, No. 1091, p. 852, 2009
- 12) 鉄道車両床面の高さ制御装置,特開 2001-322546
- 谷藤克也,ボギー車の車体上下曲げ振動に及ぼす支 持ばねの影響(第3報,空気ばねパンク時の走行振 動と乗り心地),日本機械学会論文集(C編), Vol. 56, No. 528, pp. 18-25, 1990
- 14) 大谷光一,杉山博之,須田義大,他,車両走行状態 監視装置を用いた車両フェール検知に関する研究 (第3報:空気ばね系のフェール検知について),第 18 回鉄道技術連合シンポジウム(J·RAIL)講演論 文集, pp. 471・474, 2011