

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

米津 武則* 星野 宏則*
鈴木 江里光* 渡邊 健*

Development of Models for Co-simulation of Mechanics and Electromagnetics for Dynamic Analysis of Superconducting Maglev Vehicles Moving with Large Displacements

Takenori YONEZU Hironori HOSHINO
Erimitsu SUZUKI Ken WATANABE

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. There have already been computer simulation models of wheel-on-rail vehicles using multibody dynamics. However, unlike wheel-on-rail vehicles, Maglev vehicles have electromagnetic springs without physical contact. Co-simulation methods of mechanics and electromagnetics must be devised for Maglev simulation models. This paper describes concepts of the newly-constructed models and the results of studies using these models.

キーワード：超電導磁気浮上式鉄道，車両運動，連成シミュレーション，電磁力計算，大変位

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ているが、従来用いてきた解析モデル^{1)~3)}は微小な変位を対象としたものだったため、今回、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を作成した^{4) 5)}。

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、地震時等の変位挙動解析が行われている⁶⁾。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

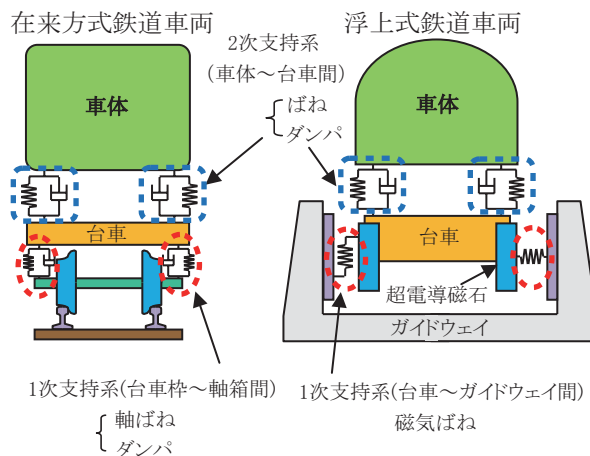


図1 在来方式鉄道車両と浮上式鉄道車両の支持系

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。

従来は、磁気ばねの部分等を等価な線形ばねで置き換えることによって計算を行っていたが、磁気ばねのばね定数は車両質量や走行速度等によって変化する特性を有している⁷⁾。このため、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

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁力応用研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

電磁力を計算するモデル（以下、電磁力モデル）と、台車・車体および車体～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ータである^{8) 9)}。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。

そこで、浮上式鉄道車両の車両モデルと電磁力モデルを新たに作成し、これらを連成させることで、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を作成した。

2. 浮上式鉄道車両の車両・電磁力連成解析モデル

2.1 車両モデルと電磁力モデルの連成手法

車両モデルと電磁力モデルを連成させるにあたり、大変位挙動解析に適した連成手法を検討する必要がある。

浮上式鉄道の電磁力計算には、過去、以下の2通りの手法が検討されてきた。

- (a) 空間領域における周波数変換を基礎とした、フーリエ級数法^{8) 9)}
- (b) 時間領域において差分的解法を用いて微分方程式を計算する時間領域数値解法^{10)~13)}

(a)を用いると解析解について定性的な理解が比較的容易になる半面、大変位時等の非線形な運動を解析するのが困難である。本研究では、非線形な運動特性まで考慮した解析が必要なことから、(b)の時間領域数値解法を選択した。

また、時間領域数値解法を用いて車両モデルと電磁力モデルを連成させるにあたって、以下の2通りの手法が考えられる¹¹⁾。

- (ア) 機械力学的挙動と電磁気的挙動の連成表現を求め、統合的な方程式を用いて解析を行う（連成解法）
- (イ) 電磁力モデルの方程式を解き、その解を用いて車両モデルのパラメータを定め、次に車両モデルの方程式を解き、その解を用いて電磁力モデルのパラメータを定める、といったように電磁力モデルと車両モデルの方程式を交互に解く（反復解法）

車両モデル、電磁力モデルの方程式が共に簡易であれば(ア)の手法を用いることも可能であるが、方程式が複雑になると従って、連成表現を求めることが困難になってくると考えられる。本研究では、複雑な方程式を解くことが求められることから、(イ)の反復解法^{10) 12)}を選択した。

浮上式鉄道車両の電磁力計算は長い計算時間を要する

電磁力モデル

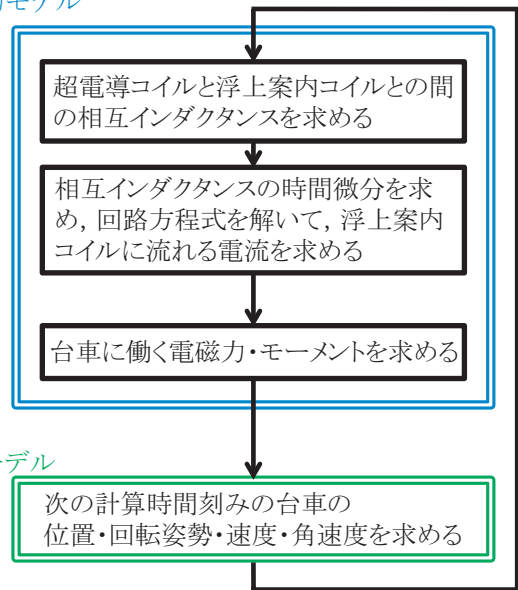


図2 浮上式鉄道車両運動解析モデルにおける解析の流れ

¹⁴⁾。計算を簡略化することによって計算速度を向上させる取り組みも行われた¹⁴⁾が、本研究の目的は大変位時の車両運動の解析であり、なるべく電磁力計算は簡略化させないことが望ましい。

作成したモデル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、今回は、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入力として与え、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。

2.2 車両モデル

従来の浮上式鉄道車両運動解析モデル^{1)~3)}は、運動方程式の記述に際して微小変位の仮定を設け、前後・上下・ピッチング系モデルと左右・ローリング・ヨーイング系モデルを別々の独立した運動方程式で構成していた。

今回新たに作成したモデルは、マルチボディダイナミクス的手法を取り入れ、6自由度の剛体運動を統合的に表現した。

作成した車両モデル⁴⁾を図3に示す。車両モデルは汎

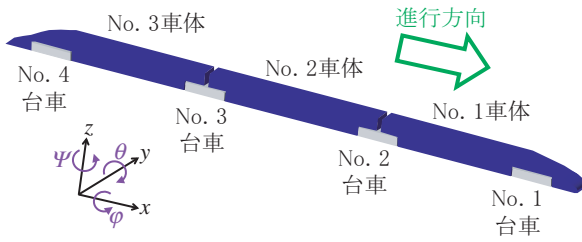


図3 車両モデル

用のマルチボディダイナミクス解析ソフトウェアRecurDyn¹⁵⁾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No. 1～4台車、No. 1～3車体と称する。No. 1、No. 3車体は先頭車体および後尾車体、No. 2車体は中間車体である。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ψ、θ、φとした。ψ、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、ピッチング、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、基礎的検討として、各結合要素は線形なモデル^{1)～3)}とした。なお、空気ばねは、絞りと補助空気溜の効果を考慮したモデル³⁾を用いた。

2.3 電磁力モデル

作成した電磁力モデル⁵⁾の概念図を図4に示す。電磁力モデルはC言語を用いて作成した。台車左右の超電導磁石には片側4個ずつの超電導コイルが内蔵され、左右をヌルフラックス線で結んだ4個1組の浮上案内コイル15組と超電導コイルとの間に発生する電磁力を計算する。また、計算に用いた主なパラメータ^{9) 12)}を表1に示す。

以下、図2に示した電磁力モデルの手順に沿って具体的な計算方法⁵⁾を述べる。

超電導コイルと浮上案内コイルとの間の相互インダクタンスMは次式によって与えられる。

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} n_{sc} n_{lev} \oint_{C_{sc}} \oint_{C_{lev}} \frac{ds_{sc} \cdot ds_{lev}}{r_{sc,lev}} \quad (1)$$

ただし、μ₀は透磁率、n_{sc}は超電導コイルの巻数、n_{lev}は浮上案内コイルの巻数、ds_{sc}は超電導コイルの微小要素、ds_{lev}は浮上案内コイルの微小要素、r_{sc,lev}は超電導コイルと浮上案内コイルとの微小要素の間の距離であり、超電導コイルC_{sc}と浮上案内コイルC_{lev}に対して線積分することによって求まる。

相互インダクタンスM(t)の時間微分は、鎖交磁束が計算時間刻みΔtの間、線形に変化すると仮定する¹³⁾と、次式を用いて求められる。

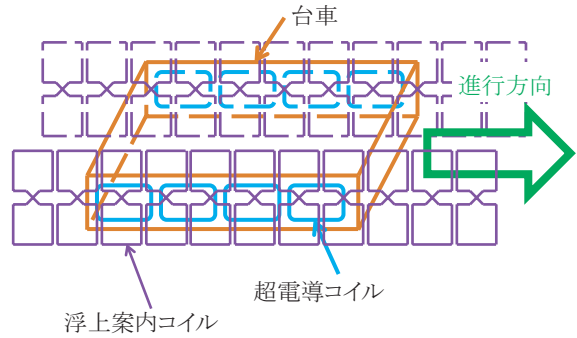


図4 電磁力モデルの概念図

表1 コイルの主な緒元

(a) 超電導コイル

項目	値
形状	レーストラック形
極数	片側4極
超電導コイルの前後間隔	1.35 [m]
起磁力	700 [kA]

(b) 浮上案内コイル

項目	値
形状	矩形
前後コイル間隔	0.45 [m]
上下コイル間隔	0.21 [m]
抵抗	8.928 [mΩ]
自己インダクタンス	0.288 [mH]
上下コイル間相互インダクタンス	21 [μH]
超電導コイルとの中心間距離	0.185 [m]

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M(t) - M(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

浮上案内コイルは、図5のように、8の字形の2つのコイルが左右をヌルフラックス線でつながれており、4つのコイルで1組となっている。i_{lev,1}、i_{lev,2}、i_{lev,3}、i_{lev,4}は各浮上案内コイルに流れる電流である。

ここで、浮上案内コイルの鎖交磁束Φ₁、Φ₂、Φ₃、Φ₄は次式によって与えられる¹²⁾。

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -M_{sc,1} \cdot i_{sc} + L \cdot i_{lev,1} - M_{mul} \cdot i_{lev,2} \\ \Phi_2 &= -M_{sc,2} \cdot i_{sc} + L \cdot i_{lev,2} - M_{mul} \cdot i_{lev,1} \\ \Phi_3 &= -M_{sc,3} \cdot i_{sc} + L \cdot i_{lev,3} - M_{mul} \cdot i_{lev,4} \\ \Phi_4 &= -M_{sc,4} \cdot i_{sc} + L \cdot i_{lev,4} - M_{mul} \cdot i_{lev,3} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、i_{sc}は超電導コイルの電流、M_{sc,1}、M_{sc,2}、M_{sc,3}、M_{sc,4}は超電導コイルと各浮上案内コイルとの相互インダクタンス、Lは浮上案内コイルの自己インダクタンス、M_{mul}は浮上案内コイルの上下間の相互インダクタンスである。

また、浮上案内コイルに流れる電流は、次に示す回路方程式を解くことによって求められる¹²⁾。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

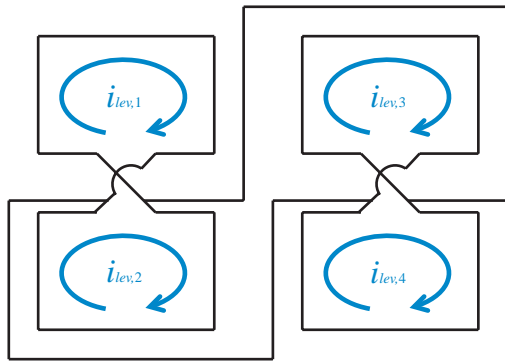


図5 浮上案内コイルに流れる電流

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial\Phi_1}{\partial t} + \frac{\partial\Phi_2}{\partial t} - i_{lev,1}R_{lev} + i_{lev,2}R_{lev} &= 0 \\
 -\frac{\partial\Phi_3}{\partial t} + \frac{\partial\Phi_4}{\partial t} - i_{lev,3}R_{lev} + i_{lev,4}R_{lev} &= 0 \\
 \frac{\partial\Phi_1}{\partial t} - \frac{\partial\Phi_3}{\partial t} + i_{lev,1}R_{lev} - i_{lev,3}R_{lev} \\
 + 2R_c(i_{lev,1} + i_{lev,2}) &= 0 \\
 i_{lev,1} + i_{lev,2} &= -(i_{lev,3} + i_{lev,4})
 \end{aligned} \tag{4}$$

ここで、 R_{lev} は浮上案内コイルの抵抗、 R_c はヌルフラックス線の抵抗である。

台車に働く電磁力・モーメントは次式によって与えられる。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F} &= \frac{\mu_0}{4\pi} n_{sc} n_{lev} i_{sc} i_{lev} \oint_{C_{sc}} \oint_{C_{lev}} \frac{d\mathbf{s}_{sc} \times (d\mathbf{s}_{lev} \times \mathbf{r}_{sc,lev})}{r_{sc,lev}^3} \\
 \mathbf{N} &= \frac{\mu_0}{4\pi} n_{sc} n_{lev} i_{sc} i_{lev} \oint_{C_{sc}} \oint_{C_{lev}} \frac{\mathbf{r}_{sc} \times \{d\mathbf{s}_{sc} \times (d\mathbf{s}_{lev} \times \mathbf{r}_{sc,lev})\}}{r_{sc,lev}^3}
 \end{aligned} \tag{5}$$

ここで、 \mathbf{F} はx, y, z方向の電磁力からなるベクトル、 \mathbf{N} は φ, θ, ψ 方向のモーメントからなるベクトル、 $\mathbf{r}_{sc,lev}$ は浮上案内コイルの要素から超電導コイルの要素に至るベクトル、 \mathbf{r}_{sc} は台車中心から超電導コイルの要素に至るベクトルである。

3. 浮上式鉄道車両運動解析モデルによる解析結果例

今回作成した浮上式鉄道車両運動解析モデルによる解析結果の例を示す。

電磁力モデルの解析結果例として、速度500km/hで定速走行している場合に台車に働く力を、また、車両・電磁力連成モデルの解析結果例として、過去に行われた現車試験との比較を示す。

3.1 電磁力モデルの解析結果例

電磁力モデルの解析では、台車の位置・回転姿勢・速度・角速度は、外的に一定値を与えることとした⁵⁾。台車中心は上下方向には8の字形浮上案内コイルの中心から常に-40mmの変位とした。また、左右変位はないもの

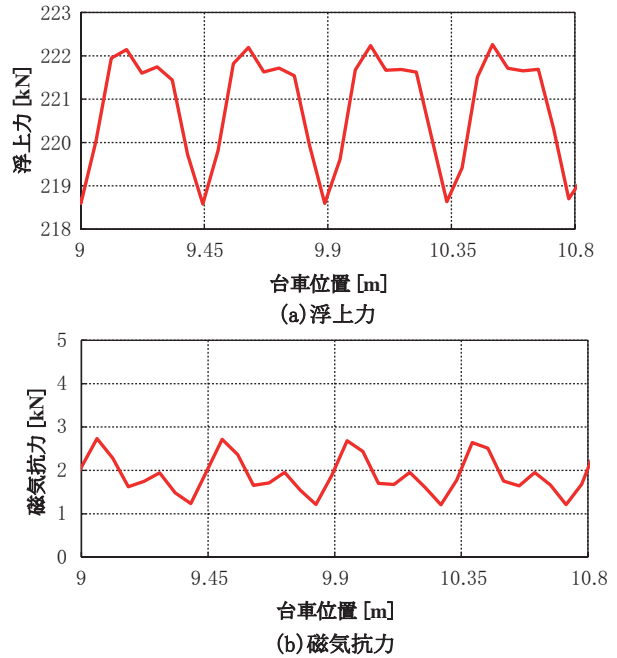


図6 解析結果例（電磁力波形）

とし、進行方向には500km/hの一定速度とした。なお、計算時間刻みは0.4msとした。

図6に解析結果例を示す。同図は浮上力（台車に+z方向に働く電磁力）および磁気抗力（浮上案内系により、台車に-x方向に働く電磁力）の時刻歴波形である。横軸は、計算開始時からの進行方向の台車位置を表す。同図より、浮上力、磁気抗力ともに浮上案内コイルの前後間隔である0.45m周期で変動していることが分かる。台車位置9m～18mの間の浮上力および磁気抗力の平均値はそれぞれ221kN、1.89kNである。

3.2 車両・電磁力連成モデルの解析結果例

車両・電磁力連成モデル（以下、モデルA）の解析では、図7に示すガイドウェイ高低変位設定試験による車両運動特性検証実験結果³⁾との比較を行った。

ガイドウェイ高低変位設定試験では、ガイドウェイの側壁ビーム1スパン（12.6m）を10mm上方へ平行移動させ、人為的な外乱を与えた場合の台車・車体の変位等を計測した³⁾。

図8に、モデルAと従来モデル³⁾（以下、モデルB）を用いた計算値、および、現車による実験値³⁾（No.3台車の台車～地上間上下変位）を示す。

図8より、ガイドウェイ高低変位設定区間を通過すると、実験値には、1次支持系の固有周波数である約5Hz²⁾の減衰振動が表れていることが分かる。モデルA、モデルBとも、約5Hzの周波数成分の減衰振動波形の初期振幅、振動周波数、減衰比に関し、実験値と概ね一致しているといえる。特に、モデルAは、モデルBによる結果に比べ、約5Hzの減衰振動の極大・極小値の現れる時

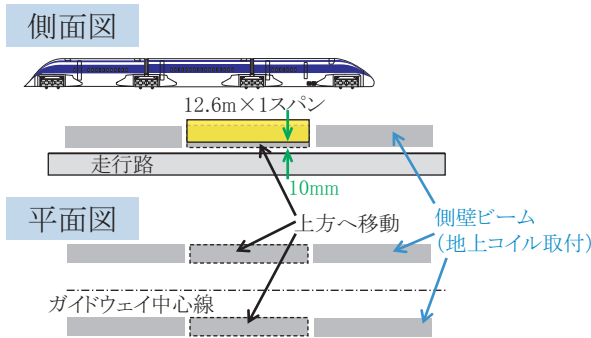


図7 ガイドウェイ高低変位設定試験

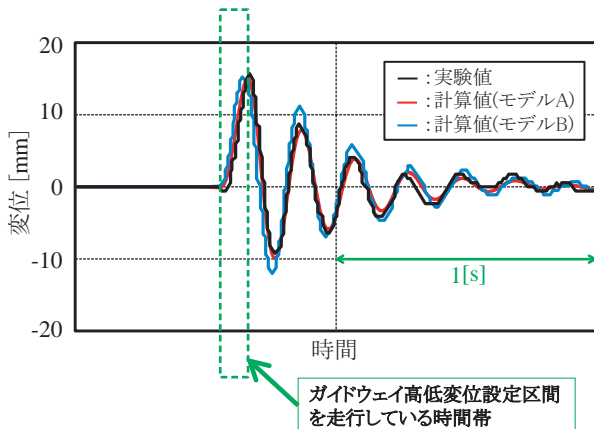


図8 ガイドウェイ高低変位設定試験の計算結果と実験結果の比較例 (No. 3 台車～地上間上下変位) (その1)

刻がより一致するようになったことに加え、3波目より前の波形で極大・極小値が実験値により近づくようになった。このことから、モデルAはモデルBと比較して再現性の向上がみられたといえる。

3.3 車両・電磁力連成モデルの解析結果に関する検討
モデルBと比べて、モデルAの変更点は以下の2点である。

- 車両モデルを従来の上下・ピッチング系の運動方程式によるモデルからマルチボディダイナミクスによるモデルに変更した
- 等価磁気ばね定数を用いていた部分を逐次電磁力を計算するモデルへ変更した

モデルAによる実験値の再現性の向上の原因について検討する。

モデルBで用いている等価磁気ばね定数 k_{ij} は、他の座標を固定した状態で、 j 方向に変位あるいは角変位させた場合に、 i 方向に発生する力あるいはモーメントから求められる^{7) 16)}。例えば、上下方向等価磁気ばね定数 k_{zz} は以下の式で定義される。

$$k_{zz} = -\frac{F_z}{z_{sc} - z_{lev}} \quad (6)$$

表2 等価磁気ばね定数

項目	単位	実験値から同定した値	モデルBで使用した値
k_{zz}	MN/m	5.5	5.0
$k_{z\theta}$	MN/rad	-0.22	-0.10
$k_{\theta z}$	MN	0.21	0.27
$k_{\theta\theta}$	MN・m/rad	13	11

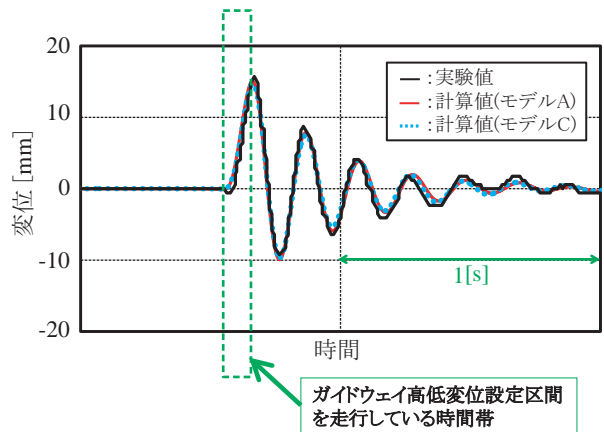


図9 ガイドウェイ高低変位設定試験の計算結果と実験結果の比較例 (No. 3 台車～地上間上下変位) (その2)

ここで、 z_{sc} は超電導コイル上下中心位置、 z_{lev} は浮上案内コイル上下中心位置、 F_z は浮上力である。また、 $z_{sc} - z_{lev}$ は台車の上下変位である。

図8の実験値より上下・ピッチング系の等価磁気ばね定数^{7) 16)}を同定した結果を表2に示す。

次に、モデルAの電磁力モデルの部分を表2の等価磁気ばね定数(実験値から同定した値)によって置き換えたモデル(以下、モデルC)を用いて計算を行った。図9にモデルCを用いた計算結果を示す。同図には、前出のモデルAの計算値、現車試験の実験値³⁾を併記した。

図9より、モデルCによる結果は、モデルAとほぼ等しくなった。モデルBにおける等価磁気ばね定数¹⁶⁾を表2に示すが、モデルAがモデルBより実験値の再現性が向上した原因のひとつに、等価磁気ばね定数の差があることが分かる。

今回、モデルの検証に用いたガイドウェイ高低変位設定試験に関しては、等価磁気ばね定数を用いたモデルCでも精度よく解析が行えたことから、この程度の外乱に対する応答は大変位挙動として扱う必要はなかったと考えられる。なお、モデルAはモデルCに比べて約300倍の解析時間を要する。今回の解析は大変位挙動解析ではないため、モデルCによる解析で十分であったと考えられる。

今後、浮上式鉄道車両の運動解析を行うにあたって、対象とする挙動の変位の大きさ等に応じて、等価磁気ば

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

ね定数による解析モデルと逐次電磁力計算を行う解析モデルを適切に使い分けていきたい。例えば、超電導コイルのクエンチ時¹⁷⁾¹⁸⁾の車両運動など、時々刻々と磁気ばねの特性が変化する場合、モデルAのような逐次電磁力計算を行う解析モデルを用いる必要がある。

4. まとめ

車両故障・地震時等、現車では実験困難な大変位挙動の解明を目指し、マルチボディダイナミクス手法を用いた車両モデルと電磁力モデルを連成させた浮上式鉄道車両運動解析モデルを新たに作成した。各計算時間刻みにおいて台車に働く電磁力を計算することにより、大変位挙動の際に磁気ばねの特性が変化することへの対応が可能となった。

また、この作成したモデルを用いてガイドウェイ高低変位設定試験（上下変位10mm）との比較を行い、妥当性を検証した。

本稿では、新たに作成したモデルの特徴を中心に記述したが、今後、このモデルを用いて大変位挙動解析を行っていくなかで、詳細な検討を行う予定である。

今回は基礎的な検討であったため、車両モデル、電磁力モデル共に簡易なモデルとしたが、今後、種々の大変位挙動解析を行っていくにあたり、解析対象とする挙動に応じて、個々の解析モデルの詳細化を行う必要があると考えられる。モデルが精密になるに従い、計算時間等の課題¹⁴⁾も出てくるものと思われるが、解析対象に応じた適切なモデル化を行っていきたい。

なお、本研究は国土交通省からの補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 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), Vol. 71, No. 701, pp. 114-121, 2005
- 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 (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
- 3) 渡邊健, 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, 渡邊健, 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, 渡邊健, 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 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) 鳥居肅, 武南宏治, 正田英介: 超電導側壁浮上システムの三次元運動解析手法, 平成5年電気学会全国大会講演論文集 [7], No. 892, pp. 163-164, 1993
- 12) 大橋俊介, 大崎博之, 正田英介: 側壁式電磁誘導浮上システムの等価支持モデル, 電気学会論文誌D, Vol. 117, No. 6, pp. 758-767, 1997
- 13) 亀有昭久, 新倉節夫, 関秋生, 北野淳一, 宮本茂樹: 磁気浮上列車の走行シミュレーション, 第7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. 188, pp. 471-476, 1992
- 14) アーリー・ロバート, 大崎博之: 超電導磁気浮上鉄道の車両運動に対する軌道パネル構造の影響, 電気学会研究会資料, No. TER-01-35/LD-01-69, pp. 7-12, 2001
- 15) 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
- 16) 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, 1999
- 17) 岸秀敏: 超電導コイルがクエンチした時の1台車の運動, 第4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. 512, pp. 159-164, 1992
- 18) 大橋俊介, 大崎博之, 正田英介: 超電導磁気浮上列車の超電導コイルクエンチ時の走行特性, 電気学会論文誌D, Vol. 118, No. 7/8, pp. 937-946, 1998