

## 磁気浮上列車の地震動応答

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 武蔵野大学数理工学センター 公開日: 2022-02-07 キーワード: 作成者: 阿部, 修治 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://mu.repo.nii.ac.jp/records/1665">https://mu.repo.nii.ac.jp/records/1665</a>

# 磁気浮上列車の地震動応答

## Response of maglev trains to earthquake vibrations

阿部 修治<sup>1</sup>

Shuji Abe

### 概要

建設が進められている中央新幹線の磁気浮上列車の安全性の観点から、車両の地震動に対する応答を議論する。ガイドウェイ（側壁）と車両（台車と車体）から成る単純なシステムの力学モデルを設定し、過去の地震動データを入力として横方向の振動応答を計算した。その結果、震度 6 クラス以上の直下型地震においては、台車が大きく横振動し、左右のガイドウェイに衝突しながら走行する状態になる可能性が示唆された。

### 1. 鉄道の地震対策と磁気浮上列車

地震時の振動予測は複雑で困難な問題である。地震そのものが極めて複雑で多様である上に、建物の構造・形状によって振動のふるまいは異なる。シミュレーション技術は高度化したが、どの程度の安全度を見込むかということには過去の経験を踏まえて決められているという側面が大きい。鉄道車両は動いている物体ということで、問題はさらに複雑である。新幹線については、阪神淡路大震災や新潟地震のときの状況などを受けて、地震対策が進められているが、十分であるという保証はまだない。

鉄道における地震対策とは、①鉄道構造物が一定の耐震基準を満たすこと、②車両が脱線することを防止するガード等、③地震を検知すると直ちにブレーキをかける早期警戒システム、などから成っている。これらにより、想定される最大の地震においても、線路が破損せず、走行中の列車が脱線することなく停止措置できるような設計が求められている。しかし、それでも巨大地震の際に絶対に安全という保証はなく、列車が高速になればなるほど、リスクは増す。

磁気浮上式鉄道[1]の場合は経験知がなく、十分な予測が行われているわけでもない。世界中で磁気浮上式鉄道が実際に運行されているのは、中国上海の空港線（約 30 km）だけであるが、過去に地震のない地域で、最高時速で走行するのはほんの数秒だけということから、地震に関する懸念は持たれていない。一方、日本において、旧国鉄が磁気浮上方式の超高速鉄道の研究に乗り出したきっかけは、地震国日本で超高速を実現するためということであった。しかし、実際に建設中の中央新幹線（いわゆるリニア新幹線）において、地震への備えは十分なのだろうか。磁気浮上列車の場合も、地震対策の基本は通常の鉄道と同様であるが、②の脱線防止という観点が異なる。中央新幹線で採用さ

---

<sup>1</sup> 武蔵野大学数理工学センター員 / 武蔵野大学工学部数理工学科特任教授

れる方式では、車両の台車部分までの高さ（約 1.3 m）がガイドウェイという側壁で両側を覆われているため、これがいわばガードレールの役割を果たし、そのために「脱線」に相当することは起きないと言われる。

しかし、近年、大地震が頻発していることから、果たして時速 500 km/h の磁気浮上列車は本当に安全なのか、懸念が生じる[2]。地震の振動により、車両が大きく振動して左右のガイドウェイに接触し、そのときの衝撃が大きければ、ガイドウェイや車両の破損や超伝導磁石のクエンチなどが発生し、大きな事故につながる可能性がないとは言えない[3]。したがって、大地震のときに車両がどの程度振動するのか、側壁に接触するような大きな振動がありうるのか、検討しておく必要がある。

磁気浮上列車の振動については、設計当初から詳細なシミュレーションや実験が行われている。その第一義的な目的は、車両を浮上させて安定的に走行できるように設計することである。浮上車両を磁力で平衡位置に維持するが、走行状態ではさまざまな要因で平衡位置のまわりの振動が発生する。この振動を一定の範囲に抑えることが必要なのである。走行試験において台車の左右上下の変位は 5 mm 程度で、最大でも 10 mm の範囲に収まっている[4]。台車と左右のガイドウェイとの間隔は 80 mm あり、台車の側面に付いているストップ輪が接触する間隔も 40 mm なので[5]、振動は十分に小さく抑えられていると言える[6]。さらに車体の乗り心地の観点からは、台車と車体の間に空気ばねが設置され[5]、振動制御に関する研究も行われている[7]。

大地震のような大きな外力が加わった場合の大変位の振動についての研究としては、標準的な地震動スペクトルを入力とした、構造物と車両を含めた動的応答解析の報告[9]がある。それによれば、ガイドウェイと車両の相対変位は「接触限界よりも小さく、かなりの大規模地震時においても平滑な走行が確保できることが分かった」ということである。ただし、そこで使われている L2 地震動スペクトル[8]は、耐震設計の際に標準的に使われるものであるが、実際には個別の地震ごとに地震動のふるまいはさまざまであり、構造物の被害もさまざまである。本研究では、実際に起きた地震と同じ地震動が加わったとしたら、どのような応答を示すかを調べてみる。

## 2. 力学モデル

最も基本的な問題として、地震時の列車の横振動を調べることにする。実際には、振動が長編成の列車全体で起こり、複雑な動きをすることになるが、それは別の問題としてここでは扱わず、地震発生の瞬間の列車の 1 カ所の動きだけを見る。

車両は客室のある車体とそれを支える台車から成る。台車の超伝導磁石とガイドウェイの電磁石の間の磁気力により浮上走行する。車両断面の力学モデルを図 1 に示す。台車と車体の横方向の変位だけを考え、上下動および回転の自由度は無視する。地上のガイドウェイは通常は静止しているが、地震によって動きが与えられるものとする。

ガイドウェイと台車間の磁気力を実効的な磁気ばねで表すことができ、台車と車体間は物理的な支持ばね（空気ばね）で結合している。支持ばねは車体の振動を減衰させるダンパーの役割も担っている。一方、磁気ばねの磁気力にはそのような減衰作用はない。

左右方向の座標軸を  $y$  とし, 台車の変位を  $y_1$ , 車体の変位を  $y_2$  とする. これらはガイドウェイに対する相対位置ではなく, 絶対座標である. ガイドウェイの変位を  $y_0(t)$  とし, 地震のないときの位置を原点に取る. 台車と車体の左右変位の原点はガイドウェイと同じである. 台車は  $500 \text{ km/h}$  で走行している状態を想定している.

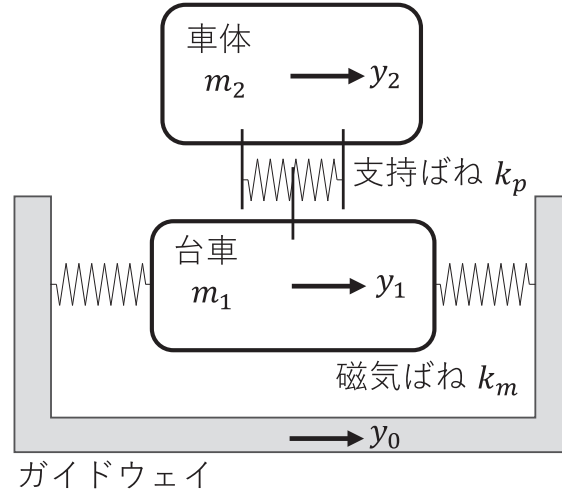


図 1. 磁気浮上列車の横振動の力学モデル

台車と車体の質量をそれぞれ  $m_1, m_2$  とすると, 横方向の運動方程式は次のようになる.

$$\text{台車: } m_1 \ddot{y}_1 = F_{10} + F_{12} \quad (1)$$

$$\text{車体: } m_2 \ddot{y}_2 = F_{21} \quad (2)$$

右辺の力のうち,  $F_{10}$  は台車がガイドウェイから受ける磁気反発力で, 実効ばね定数を  $k_m$  として

$$F_{10} = -k_m (y_1 - y_0(t)) \quad (3)$$

の形を仮定する. ガイドウェイの変位  $y_0(t)$  は外部から地震動で与えられる.

一方, 台車と車体の間で, 台車が車体から受ける力  $F_{12}$  と, 車体が台車から受ける力  $F_{21}$  は作用反作用の関係にある ( $F_{21} = -F_{12}$ ). 台車と車体は, 図 1 のように, 支持ばねを介して結合されている. 支持ばねとして用いられている空気ばねは, 直径  $40 \text{ cm}$  程度の扁平な円形であるが[3], 横方向の変位の許容範囲は  $10 \text{ cm}$  程度であり, それ以上変形すると空気ばねがパンクする恐れがあるため, ストップが設けられている[10]. このことを考慮し, 支持ばねについては非線形項を入れたモデルを使う. つまり, 支持ばねのポテンシャルエネルギーを

$$V(x) = \frac{1}{2} k_p x^2 \left( 1 + \frac{x^2}{D^2} \right) \quad (4)$$

の形に仮定する. ここで,  $k_p$  はばね定数,  $D$  は変位限界に相当し, 変位  $x$  が  $D$  程度を超えるとばねは急激に硬くなる. このポテンシャルに対応するばねの力は

$$f(x) = -\frac{d}{dx}V(x) = -k_p x - \frac{2k_p}{D^2} x^3 \quad (5)$$

である．ここにさらに減衰項（減衰定数  $c$ ）を加え，台車と車体間の力を

$$F_{21} = f(y_2 - y_1) - c(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) = -F_{12} \quad (6)$$

のように仮定する．

パラメタの値については，文献[7]などを参考に，次の値を使う．

$$\text{台車質量 } m_1 = 6.0 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$\text{車体質量 } m_2 = 14.0 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$\text{磁気ばね定数 } k_m = 3.1 \times 10^6 \text{ kg/s}^2 \text{ (500 km/h 走行時)}$$

$$\text{支持ばね定数 } k_p = 0.60 \times 10^6 \text{ kg/s}^2$$

$$\text{支持ばね減衰定数 } c = 5.0 \times 10^4 \text{ kg/s}$$

$$\text{支持ばね変位限界 } D = 0.10 \text{ m}$$

### 3. 計算方法

地震時のガイドウェイの変位  $y_0(t)$  は，地震動の観測データが通常，位置ではなく加速度で与えられていることを考慮し，次のような変数変換を行う．

$$Y_1 = y_1 - y_0(t) \quad (7)$$

$$Y_2 = y_2 - y_1 \quad (8)$$

$$A(t) = \ddot{y}_0(t) \quad (9)$$

$A(t)$  はガイドウェイの加速度である．この変換によって，運動方程式(1)(2)は次のようになる．

$$\ddot{Y}_1 = -\frac{k_m}{m_1} Y_1 - \frac{1}{m_1} f(Y_2) + \frac{c}{m_1} \dot{Y}_2 - A(t) \quad (10)$$

$$\ddot{Y}_2 = \frac{k_m}{m_2} Y_1 + \frac{1}{\mu} f(Y_2) - \frac{c}{\mu} \dot{Y}_2 \quad (11)$$

ただし  $\mu$  は台車と車体の相対運動に関する換算質量である．

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (12)$$

ガイドウェイの加速度  $A(t)$  として，観測された地震動の加速度データを使うことにする．具体的には，気象庁の「強震観測データ」として公開されているもの[11]を使う．観測データのサンプリング周波数は 100 Hz ないし 50 Hz なので，0.01 秒ないし 0.02 秒の時間間隔の離散データである．これを  $A(t)$  の入力とし，運動方程式(10)(11)を 4 次の Runge-Kutta 法により数値的に解く．プログラミングは python を用いて行った．

なお，地震動の観測値は決して滑らかな関数でなく，長周期から短周期まで幅広い周波数を含む振動であり，観測のサンプリング周波数以上の高周波の振動はカットされている．よって，微分方程式をそのような高周波までの精度で計算することはできない．

実際には、通常の列車走行時においても、ガイドウェイ構造やコイル配置などの小さな乱れや、走行時の空気流の影響などのため、列車はたえず安定位置の付近で細かく振動している。ここではそれを再現することは意図しておらず、その意味で、地震動データが高周波カットされていることはそれほど問題ではない。われわれが通常の地震で感じるように、地震動として重要なのは、ある程度長時間の振動成分であり、その目的の範囲において、数値計算における離散化誤差は重要でないと考えられる。

#### 4. 計算結果

本研究では、表 1 に示す過去の 4 つの大きな地震の地震動データを計算に用いた。それぞれの地震動は NS (北南)、EW (東西)、および UD (上下) の 3 方向成分の加速度データであるが、計算には水平成分のうち、最大加速度の大きいほうのデータを使った。なお、加速度データの単位は  $\text{gal} = \text{cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$  である。

表 1 本研究で利用した地震動データ [11]

	地震	年月日	観測地点	震度	最大加速度 (gal)
1	東北地方太平洋沖地震	2011/03/11	宮城県大崎市古川三日町	6 強	567.7
2	新潟県中越沖地震	2007/07/16	新潟県出雲崎町米田	6 弱	701.0
3	新潟県中越地震	2004/10/23	新潟県川口町川口	7	1722.0
4	兵庫県南部地震	1995/01/17	兵庫県神戸市中央区中山手	6	891.0

##### 【地震-1】東北地方太平洋沖地震 (2011 年)

海溝型地震として最大級の 2011 年東北地方太平洋沖地震において宮城県大崎市で観測された地震動の加速度 (NS 成分) を図 2 に示す。

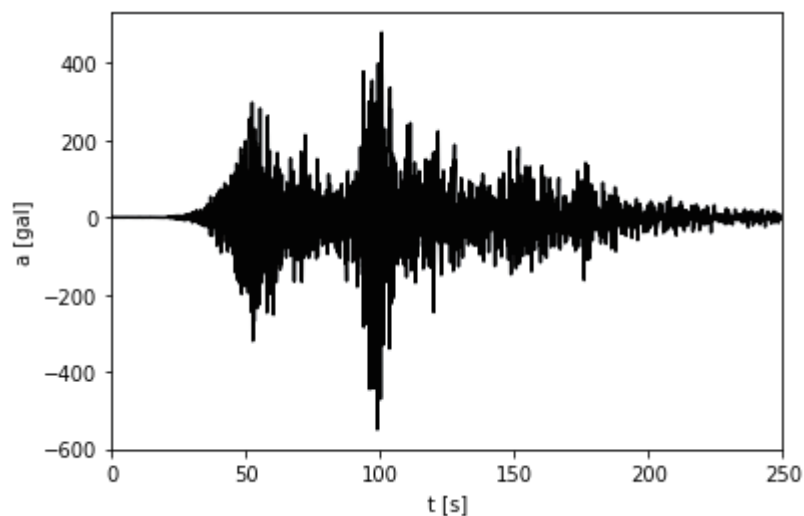


図 2. 地震-1 の加速度データ (NS 成分)

これを入力として計算された台車の変位の時間変動を図 3 に示す. 最も振動の激しい  $t = 100$  秒付近で, 案内ストッパ輪がガイドウェイに接触する 40 mm を超える変位が数回起こるといふ計算結果になった. しかし, 台車がガイドウェイに接触する 80 mm を超えることはなかった.

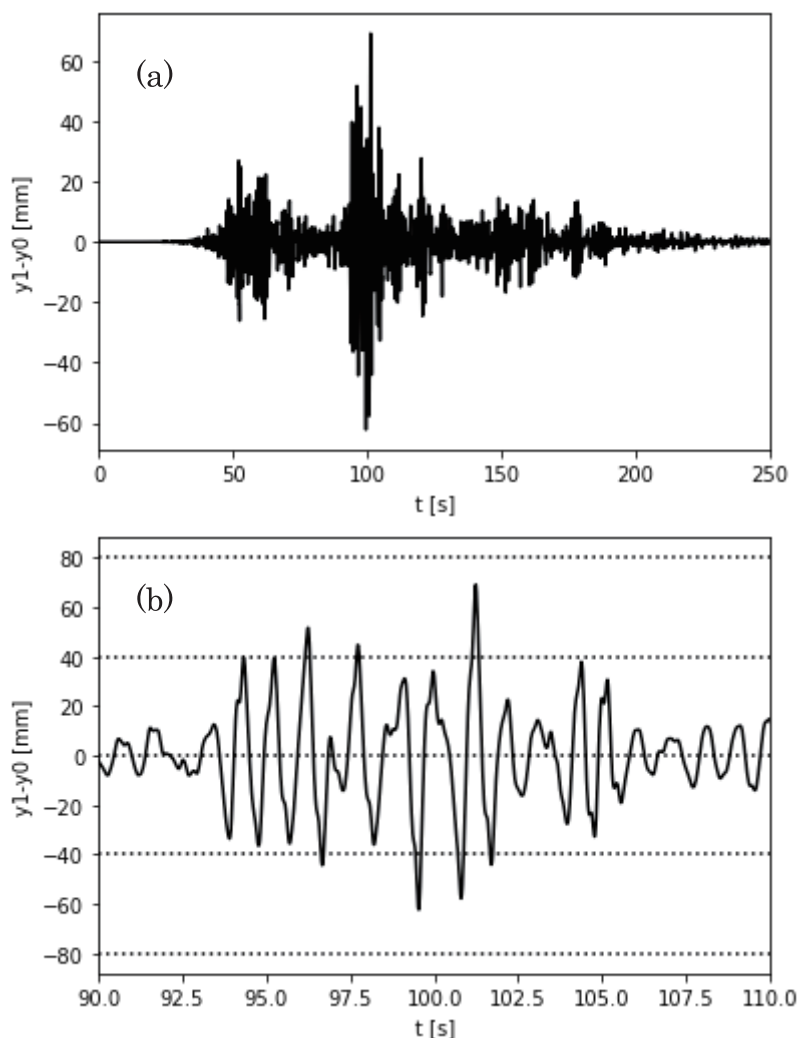


図 3. 地震-1 の場合の台車の変位の計算結果 :  
(b)は(a)の振幅の大きい時間領域を拡大したもの.

**【地震-4】兵庫県南部地震 (1995 年)**

次に, 直下型地震の典型例として, 1995 年の兵庫県南部地震において神戸で観測された地震動の加速度 (NS 成分) を図 4 に示す.

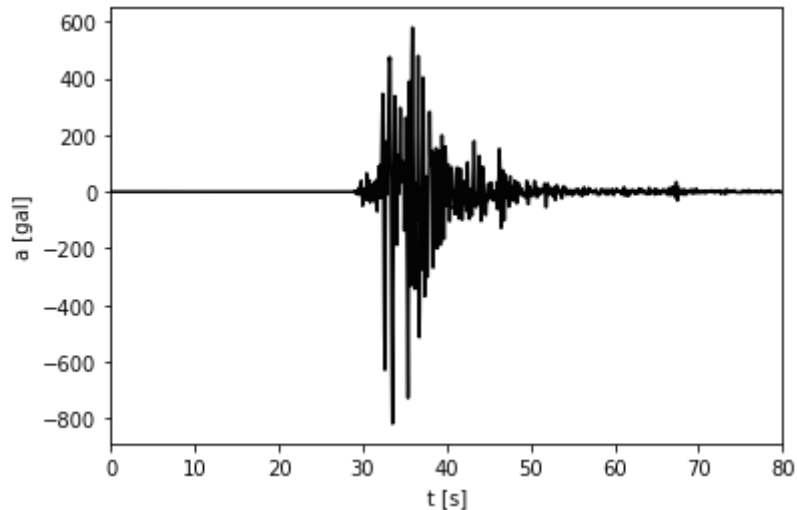


図 4. 地震-4 の加速度データ (NS 成分)

これを入力として計算された台車の変位の時間変動を図 5 に示す. 案内ストッパ輪がガイドウェイに接触する 40 mm を超える変位が数回起き、そのうち何回かは台車がガイドウェイに接触する限界の 80 mm を超え、最大の変位は約 120 mm に達した.

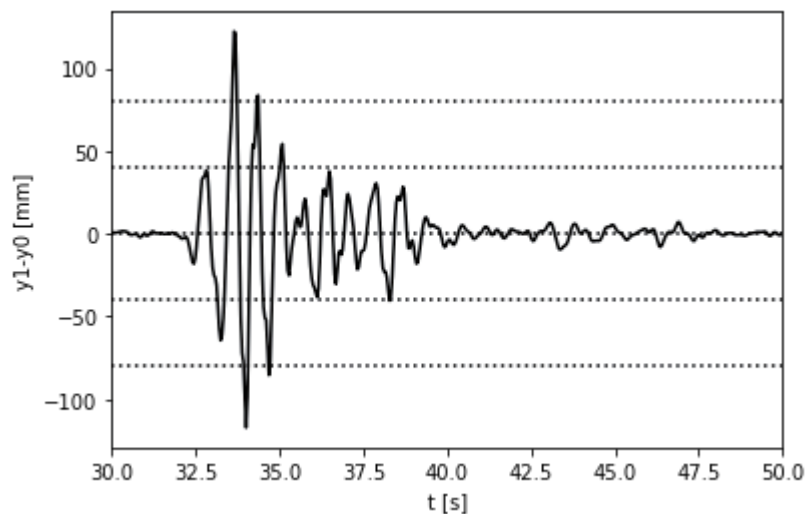


図 5. 地震-4 の場合の台車の変位の計算結果

台車の振動に対して、車体の振動の計算結果について述べる. 地震-4 の場合の車体の振動の計算結果は図 6 のようになっている. 車体は台車と同位相で振動し、変位は台車に比べて 2 倍以上大きくなっている. 車体支持空気ばねの役割は、通常の走行中は台車の振動に比べて車体の振動を抑える目的であるが、地震時には逆に共振により増幅されて大きく振動することが分かる. 実際、変位のピーク付近では、台車と車体の相対変位は空気ばねの変位限界にほぼ達していて、もはやダンパーとしての役割を失っていることがわかる. ガイドウェイは台車の高さまでしかないので、車体が大きく揺れてもガイ

ドウェイに接触することはないが、このような大きな振動は乗客に強い横揺れの衝撃を与えることは確かである。

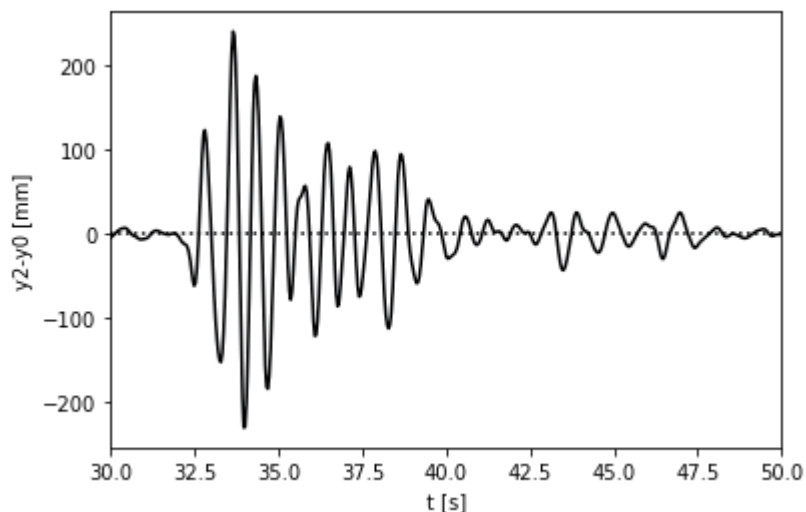


図 6. 地震-4 の場合の車体の横変位の計算結果

他の 2 つの地震も含め、計算結果をまとめたのが表 2 である。台車に比べて車体のほうが 2 倍以上大きく振動している点は共通に見られる。ただし、浮上列車への地震の影響は、最大加速度だけで決まるものではなく、それぞれの地震動によって影響は異なっており、兵庫県南部地震のように、比較的短時間に強い揺れが生じた場合に振動はより増幅されている。

表 2. 計算結果のまとめ

	地震 [計算に用いた成分]	台車・側壁間の変位			車体・側壁間の最大変位 [mm]
		最大変位 [mm]	40 mm を超える回数	80 mm を超える回数	
1	東北地方太平洋沖地震(2011) [NS]	69.1	7	0	159
2	新潟県中越沖地震(2007) [NS]	68.5	4	0	163
3	新潟県中越地震(2004) [EW]	76.4	7	0	176
4	兵庫県南部地震(1995) [NS]	122	7	4	241

## 5. 結論

本研究のモデル計算の範囲で分かったことは次のとおりである。震度 6 以上の大地震において、台車は最大加速度の振動を受ける数秒間に、案内ストッパ輪が左右のガイド

ウェイに数回、ほぼ確実に接触する。地震の揺れ方によっては、台車が左右のガイドウェイに衝突することもありうる。海溝型地震よりも直下型地震のほうが、振動の増幅度が大きい、地震ごとの違いも大きい。さらに、車体は台車に比べて振動が2倍以上に増幅される。

本研究では横方向の変位の自由度だけを考慮したモデルで計算した。実際には地震動の上下成分も大きいので、それによる車両の上下振動や剛体回転の自由度も考慮することが今後の課題である。その場合、現在の磁気浮上システムにおいては、磁気反発力が台車の上下位置によって変化することから、線形ばね近似よりも正確に磁気力を扱うことが必要となる。また、地震計で観測された地面の振動をそのままガイドウェイの加速度としたが、より現実に近づけるには、高架橋構造における揺れの増幅を考慮に入れることも必要である。

## 参考文献

- [1] 電気鉄道ハンドブック編集委員会,『電気鉄道ハンドブック』(コロナ社, 2007), 12章.
- [2] 石橋克彦,『リニア新幹線と南海トラフ巨大地震』(集英社, 2021).
- [3] 阿部修治,「リニア新幹線の安全性」, 環境と公害, 49 巻 1 号 (2019), 13-18.
- [4] 吉岡博, 鈴木江里光, 清野寛, 阿座上雅芳, 大島浩, 中西俊勝,「山梨実験線車両 MLX01 の車両運動特性」, 鉄道総研報告, 12 巻 8 号 (1998), 21-26.
- [5] 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, 10 巻 1 号 (1996), 11-16.
- [6] 高橋潔,「高速リニアの安全性」, 日本機械学会誌, 106 巻, 1012 号 (2003), 162-163.
- [7] 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」, 日本機械学会論文集 (C 編), 71 巻 701 号 (2005), 114-121.
- [8] 国土交通省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編,『鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計』(丸善出版, 2012).
- [9] 上野眞, 曾我部正道, 宮本雅章, 松本信之, 涌井一,「水平加振される浮上車両の動的挙動」, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 57 回第 1 部門 (2002), 1093-1094.
- [10] 北田秀樹,「新幹線用空気ばねの開発の歴史」, SEI テクニカルレビュー, 190 号 (2017), 105-110.
- [11] 気象庁,『強震観測データ』  
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html> (2019 年 8 月ダウンロード).

(原稿提出: 2021 年 11 月 18 日; 修正稿提出: 2021 年 11 月 23 日)