軌道の不整が機械式浮上力制御を行う 磁気浮上車両の運動に及ぼす影響*

(分布した磁石を取付けた台車の軌道不整量平均化効果の影響)

綱 島 均^{*1}, 安 部 正 人^{*2}

The Influence of Guideway Surface Roughness on a Magnetically Levitated Vehicle with Mechanical Levitation Control (The Roughness Averaging Effect of Undercarriage with Longitudinally Distributed Magnet)

Hitoshi TSUNASHIMA and Masato ABE

This paper describes the influence of the guideway surface roughness on the vertical motion of a transport vehicle that has a permanent magnet suspension with mechanical air gap control. The roughness averaging effect of the undercarriage with a longitudinally distributed magnet is evaluated by a two-degree-of freedom (2DOF) model with a filter, which is equivalent to the roughness averaging effect. The results show that the difference in the averaging effect between the wheelbase length of the undercarriage and longitudinally distributed magnet causes the increase of the guide wheel load, and that the suitable magnet length is about 1.6 times the wheelbase length. By a running simulation, it is also shown that the proposed 2DOF model can express vertical vehicle motion effectively when pitching motion is relatively small.

Key Words: Railway, Forced Vibration, Magnetic Levitation, Vehicle Dynamics, Modeling, Simulation

1. ま え が き

最近の都市内交通には、安全性、利便性、経済性に
加えて乗り心地の良さや都市環境への適合性が要求さ
れており、これらの要求に答えるものの一つとして磁
気浮上式鉄道の導入が検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。磁気浮上
式鉄道に用いられる浮上方式の一つに、永久磁石の吸
引力を利用して車体を支持し、この吸引力をリンク機
構により機械的に調整する方式がある⁽³⁾。この方式は、
浮上のために外部から供給するエネルギーが不要なた
め経済性にすぐれている。この方式では、磁気浮上力
の機械的調節と安定化のために補助的な支持車輪（垂
直案内輪）が必要であり、この車輪が常に軌道に接触
していることが特徴的な点である。

著者らは、前記の機械式浮上力制御機構を用いた磁
気浮上方式を採用する車両の最適化を目的とした検討
を行い、磁気浮上力を調整するリンク機構の最適設計
条件および車両の上下運動を抑制し、垂直案内輪に作
用する荷重を低減させるための動的パラメータの設定
ガイドラインを提案した⁽⁴⁾。

このタイプの磁気浮上車両の上下運動の特徴は、軌
道の変位により垂直案内輪が加振される点と浮上力を
受ける点を同じ1点で代表した2自由度モデルにより
明確に表現することができる。しかし、実際には車体
は前後方向に分布した磁石を取付けた台車により二次支
持されており、さらにこの台車は、前後に垂直案内輪
を配置しているので、軌道の変位に応じた外力の伝達
経路は磁石を経由するものと垂直案内輪を経由するも
のとで異なっている。特に、前後方向に分布した磁石
は短波長領域において軌道不整量を平均化する効果
（空間フィルタ効果）を持っており⁽⁵⁾、また台車も軸距
に応じた軌道不整量平均化効果を有していることが知
られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。したがって、車両の乗り心地を考慮し
て軌道の許容不整量を決定する際には、前記の軌道不
整量平均化効果を考慮する必要がある。とりわけ、こ
れら二つの異なった軌道不整量平均化効果が組合さ
った場合に、この効果が車両の乗り心地や垂直案内輪に
作用する荷重に及ぼす影響の評価をすることは、車両
と軌道の関係をさらに明確にし、最適な車両-軌道系
を検討する上で意義があると考えられる。

本報では、まず、分布した磁石を取付けた台車の軌
道不整量平均化効果を考慮した2自由度上下振動モデ
ルを構成する。次に、構成したモデルを用いて軌道不

* 原稿受付 平成3年10月24日。

^{*1} 正員、(株)神戸製鋼所 (〒657 神戸市灘区岩屋中町4-2-8)。

^{*2} 正員、神奈川工科大学 (〒243-02 厚木市下荻野1030)。

$$+k_c(1/A^2)\Delta U_a \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$m_s \ddot{X}_s = -C_s(\dot{X}_s - \dot{X}_U) - k_s(X_s - X_U)$$

$$-C_s(ab/A)\dot{U}_a - k_s(ab/A)U_a \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここで

$$X_U = -AX_G, \quad U_a = -AU_u,$$

$$\Delta U_a = -A(U_u - U_i)$$

車両を励振する変位 (U_u, U_i) は、軌道の上下変位 U が台車および前後方向に分布した磁石の空間フィルタを通過して平均化されて出力されたものと考えられる。そこで、それぞれの空間フィルタの伝達関数を、 $G_B(s), G_M(s)$ で定義すれば、空間フィルタを考慮した車両の2自由度上下振動モデルが図2のように得られる。この振動系は、次のような特徴を有している。1) リンク比に応じて、台車の固有振動数と減衰比が変化する。2) 車体が軌道の上下変位により直接加振される。3) 台車および前後方向に分布した磁石の持つ軌道の不整を平均化する効果の違いによる力が台車および垂直案内輪に作用する。1)および2)の乗り心地および垂直案内輪荷重への影響を考慮した車両の動的パラメータの最適化は、文献(4)に報告されている。本報では、3)の影響を以下において具体的に検討する。

3. 二つの異なる空間フィルタの影響

3.1 空間フィルタの表現 台車および分布した磁石の空間フィルタ効果を検討するためのモデルを図3に示す。ここでは、垂直案内輪が走行する案内レールと磁石が浮上力を発生するためのリアクションレール

$$\begin{bmatrix} X_G(s)/U(s) \\ X_S(s)/U(s) \end{bmatrix} = A^{-1}(s) \left\{ G_B(s) \mathbf{B}(s) + k_c \begin{bmatrix} G_B(s) - G_M(s) \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \cdots \cdots \cdots (9)$$

ここで

$$A(s) = \begin{bmatrix} m_s s^2 + (C_s A^2 + C_G a^2) s + (k_s A^2 + k_G A) C_s A s + k_s A \\ C_s A s + k_s A m_s s^2 + C_s s + k_s \end{bmatrix}$$

ルは相対誤差がない理想状態で取付けられていると仮定する。

台車の中心の上下変位と軌道の上下変位間の伝達関数は、次式で表現できる⁽⁶⁾。

$$G_B(s) = \frac{1}{2} \left[1 + \exp \left(-\frac{l}{V} s \right) \right] \cdots \cdots \cdots (6)$$

一方、前後方向に分布した磁石は、軌道と磁石間の相対変位を磁石長にわたって積分したものに比例する浮上力を発生すると考えられる。したがって、磁石に関する上下変位は、磁石の中央1点で代表した軌道と磁石間の相対変位を、次の特性を持つフィルタに通して得られるものと等価であると考えられる⁽⁵⁾。

$$\frac{\lambda}{\lambda l_m} \sin \frac{\pi l_m}{\lambda} \cdots \cdots \cdots (7)$$

したがって、図3で示されるモデルに対して、分布した磁石の上下変位と軌道の上下変位間の伝達関数が次式のように得られる。

$$G_M(s) = \left(\frac{\lambda}{\pi l_m} \sin \frac{\pi l_m}{\lambda} \right) \exp \left(-\frac{l}{2V} s \right) \cdots (8)$$

波長 λ と s は $s = i2\pi V/\lambda$ により関係づけられているので、式(6)および式(8)は速度に関係なく波長 λ のみの関数となる。

3.2 車両の応答 軌道の上下変位と台車および車体の上下変位間の伝達関数は、式(1), (2)を Laplace 変換し、 $U_u(s) = G_B(s)U(s)$, $U_i(s) = G_M(s)U(s)$ より次式になる。

図2 車両の2自由度上下振動モデル

$$B(s) = \begin{bmatrix} (C_{sab}A + C_{ca}^2)s + (k_{sab}A + k_{ca}A) \\ C_{sabs} + k_{sab} \end{bmatrix}$$

また、軌道の上下変位と垂直案内輪に作用する荷重間

図3 分布した磁石を持つ台車のモデル

図4 軌道の高低狂いのパワースペクトル

(a) 上下振動加速度 PSD

の伝達関数は、次式となる。

$$R(s)/U(s) = \{(ab/A)m_{cs}^2 + (C_{ca}^2/A)s\} \times \{X_c(s)/U(s)\} - (C_{sa}^2/A)sG_B(s) - (ab/A)k_c\{G_B(s) - G_M(s)\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(9)、(10)には、台車と分布した磁石の空間フィルタの伝達関数の差に依存する項があり、この項は磁石の等価ばね定数 k_c に比例する。一般に、磁石の等価ばね定数は大きな値をとることから、この差を小さくするような設計が、乗り心地の向上および垂直案内輪に作用する荷重の軽減という立場から有効であることが予想される。

3.3 応答の評価 車両の現実的な乗り心地および垂直案内輪に作用する荷重を評価するために、軌道の高低狂いのパワースペクトル (PSD) を用いて、車体の上下振動加速度 PSD と垂直案内輪荷重 PSD を次式により計算する。

$$S_o(f) = |H(f)|^2 S_i(f) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $H(f)$ は車体の上下振動加速度あるいは垂直案内輪荷重の周波数応答関数、 $S_i(f)$ は軌道の高低狂いのパワースペクトルである。

表1 車両の諸元

Symbol	Unit	Value	Symbol	Unit	Value
m_s	kg	14.3×10^3	C_G	Ns/m	4.90×10^4
m_G	kg	3.7×10^3	a		3.5
k_s	N/m	7.84×10^5	b		1.0
k_G	N/m	8.82×10^6	l_m	m	4.7
C_s	Ns/m	9.80×10^3	l	m	3.22

(b) 垂直案内輪荷重 PSD

図5 空間フィルタの効果

また、車体の上下振動加速度および垂直案内輪荷重の rms 値は、式(11)によって得られたパワースペクトルを周波数で積分することにより求める。

4. 計算例

4.1 計算に用いた車両と軌道の諸元 計算に用いた車両の諸元を表1に示す。軌道の高低狂いのパワースペクトルは、一般に波数の2乗に反比例することが知られているが、ここでは鉄レール面の特性を考慮して、短波長領域では波数の4乗に反比例するように設定した⁽⁴⁾(図4)。

4.2 計算結果の検討 空間フィルタ効果を考慮したものと無視したものの車体の上下振動加速度および垂直案内輪荷重における比較を図5に示す。この時

の車両走行速度は 80 km/h である。ここでは垂直案内輪荷重は、車両重量によって無次元化してある。車体の上下振動加速度 PSD と垂直案内輪荷重 PSD には台車の空間フィルタ効果により落込みが生じていることがわかる。垂直案内輪荷重 PSD においては、特に、3~8 Hz の応答が大きくなっている。これは、二つの異なる空間フィルタの差の影響が、この周波数付近で増大していることを示している。一方、車体の上下振動加速度 PSD では、7 Hz 付近での応答が若干増大するが、問題となるようなレベルではない。したがって、二つの異なる空間フィルタの差の影響は、乗り心地よりもむしろ垂直案内輪荷重に与える影響のほうが大きいと言える。

台車軸距を固定して磁石長を変化させたものを図6

(a) 上下振動加速度 PSD

(b) 垂直案内輪荷重 PSD

図6 磁石長の影響 ($l=3.22$ m)

(a) 上下振動加速度 PSD

(b) 垂直案内輪荷重 PSD

図7 台車軸距の影響 ($l_m=4.70$ m)

に示す。磁石長が標準値 ($l_m = 4.70$ m) から 50% 減少すると、10 Hz 以下の周波数領域で車体の上下振動加速度と垂直案内輪荷重の応答が増大する。反対に、磁石長が標準値から 50% 増加すると車体の上下振動加速度は減少するが、垂直案内輪荷重は 3~5 Hz 以外の周波数領域で再び増大している。磁石長が増大あるいは減少することによる台車と磁石の空間フィルタ効果の差異の影響は、特に、10 Hz 以下の周波数領域での垂直案内輪荷重を増大させることがわかる。

磁石長を固定し台車の軸距を変化させたものを図 7 に示す。この場合、車体の上下振動加速度 PSD では、落込みが発生する周波数は変化するが、問題となるような大きな変動は発生していない。一方、垂直案内輪荷重 PSD には顕著な変化が現れる。台車軸距が標準値 ($l = 3.22$ m) から 50% 短くなった場合でも 50% 長くなった場合でも垂直案内輪荷重は、5 Hz 以下の領域で大きく増加する。特に、台車の軸距が短くなった場合の垂直案内輪荷重の増加が著しい。

前記の検討から、台車軸距と磁石長には最適な長さ

の関係が存在することがわかる。そこで、この最適な長さの組合せを検討するために、台車軸距と磁石長をパラメータとして車体の上下振動加速度および垂直案内輪荷重の rms 値による評価を行った。結果を図 8 に示す。垂直案内輪荷重の rms 値は、台車軸距に無関係に磁石長が台車軸距の 1.6 倍付近で最小になっていることがわかる。台車軸距の短いほうが垂直案内輪荷重の rms 値が小さくなっているのは、車両を励振する二つの変位（軌道の上下変位を入力とした台車と磁石の空間フィルタの出力）の位相差が台車軸距が小さいほうが少なくなるからである。一方、上下振動加速度の rms 値は磁石長が長くなるにしたがって減少するが、台車軸距の影響は、この値にはほとんど現れない。したがって、二つの空間フィルタの差の影響をできるだけ抑制するという立場から車両の上下振動に着目すれば、磁石長は台車軸距の 1.6 倍程度が望ましいと言える。

5. 車両走行シミュレーション⁽⁸⁾

前章での検討結果を確認するために図 1 のモデルと表 1 の車両諸元を用いて、計算機による走行シミュレーションを行った。このモデルでは、車体の前後に台車が一式ずつ取付けられており、車体、前位台車および後位台車それぞれに対して上下運動、ローリング、ピッチングを考慮することができるが、ここでは、比較の容易性を考慮し、ローリングモードを除外した走行シミュレーションを行った。ランダムな走行路面の上下変位は、図 4 のスペクトルをもとに計算機で発生させた。このデータを入力として得られた前位台車の二次支持点での車体上下振動加速度と前位台車の前部の垂直案内輪荷重の時系列データのスペクトルを図 9 および図 10 に示す。これらのスペクトルには、台車および車体のピッチングの成分が含まれていることに注意する。

図 9 と図 6 を比較すれば、次のようなことがわかる。 $l = 3.22$ m, $l_m = 4.7$ m の標準的な状態では、スペクトルは非常によく一致している。これは、この状態では、台車のピッチングに比べて上下運動が支配的であることによる。一方、前章での検討で予想された磁石長が増減することによる垂直案内輪荷重の低い周波数での増加は、図 9 においても現れている。これに加えて、磁石長が増加した場合におこる台車のピッチングの影響による応答のピークが、垂直案内輪荷重の 3 Hz 付近に現れている。さらに図 10 と図 7 を比較すると、台車軸距が短いと台車と磁石の二つの空間フィルタの差の影響に加えて台車のピッチングが増大して垂

(a) 上下振動加速度 rms 値の変化

(b) 垂直案内輪荷重 rms 値の変化

図 8 rms 値による応答の評価

直案内輪荷重を大幅に増加させていることがわかる。

上記の検討により、分布した磁石および台車の軌道不整量平均化効果を考慮した2自由度上下振動モデルによって、台車のピッチング運動が比較的小さい場合の車両の運動を適切に表現できることが確認された。さらに、磁石長および台車軸距が変化することによる影響は、台車のピッチング運動にも顕著に現れることがわかった。

6. ま と め

機械式浮上力制御機構を持つ磁気浮上車両に対して、分布した磁石を取付けた台車が有する軌道不整量平均化効果を考慮した2自由度の上下振動モデルを構成した。さらに、このモデルを用いて、この台車の軌道

不整量平均化効果が、車両の乗り心地および垂直案内輪の荷重に及ぼす影響を検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 分布した磁石の軌道不整量平均化効果が、前後に垂直案内輪を配置した台車のそれと異なることによる影響は、垂直案内輪の荷重増加として顕著に現れる。

(2) 分布した磁石と台車の軌道不整量平均化効果の違いの影響をできるだけ抑制するという立場から車両の上下振動に着目すれば、磁石長は台車軸距の1.6倍程度が望ましい。

(3) 走行シミュレーションとの対比の結果、台車のピッチング運動が比較的小さい場合の車両の運動が、分布した磁石を取付けた台車の軌道不整量平均化

(a) 上下振動加速度 PSD

(b) 垂直案内輪荷重 PSD

図9 走行シミュレーションによる応答の時系列データのスペクトル (磁石長 l_m が変化)

(a) 上下振動加速度 PSD

(b) 垂直案内輪荷重 PSD

図10 走行シミュレーションによる応答の時系列データのスペクトル (台車軸距 l が変化)

効果を考慮した2自由度の上下振動モデルにより表現できることが確認された。

最適な磁石長と台車軸距の関係は、分布した磁石と台車の軌道不整量平均化効果の違いの影響を評価することによってある程度決定できることを示したが、これは、台車のピッチング運動にも影響されることが明らかになった。したがって、台車のピッチング運動を考慮した最適な磁石長と台車軸距の決定が、今後の重要な検討課題の一つになると考えられる。

付 録

式(1)～(3)の導出

台車の上下方向の力の静的な釣合いは、次式となる。

$$\Delta W + \Delta R + \Delta F_M = 0 \quad (12)$$

ここで、 ΔW は車両重量増分、 ΔR は垂直案内輪荷重増分、 ΔF_M は磁石吸引力増分でありそれぞれ次式で与えられる。

$$\Delta R = a[\Delta F_k - b\Delta W] \quad (13)$$

$$\Delta F_M = k_c \Delta X_G \quad (14)$$

$$\Delta F_k = -ka \Delta X_G \quad (15)$$

ただし、 ΔF_k は一次支持装置反力増分（一次支持装置ばね定数を k とする。）、 ΔX_G は台車と軌道間の相対変位とする。

式(12)～(15)から次式を得る。

$$\Delta R = (k_c ab - ka^2) \Delta W / (ka^2 - k_c) \quad (16)$$

上式より、垂直案内輪に静的な荷重が作用しない条件($\Delta R = 0$)として次式を得る。

$$k = k_c(b/a) \quad (17)$$

一方、車両の運動方程式は、次式で与えられる。

$$m_c \ddot{X}_G = F_s + F_M + R \quad (18)$$

$$m_s \ddot{X}_s = -F_s \quad (19)$$

ここで、 F_s 、 F_M 、 R はそれぞれ二次支持装置に働く力、磁石の吸引力、垂直案内輪荷重である。

二次支持装置の相対変位は、次式となる。

$$\begin{aligned} X_2 &= -b[(1+a)(X_G - U_u) + U_u - X_G] + X_G - X_s \\ &= -(ab-1)X_G - X_s + abU_u \quad (20) \end{aligned}$$

また、一次支持装置の相対変位は、次式となる。

$$\begin{aligned} X_1 &= (1+a)(X_G - U_u) + U_u - X_G \\ &= a(X_G - U_u) \quad (21) \end{aligned}$$

したがって、車両に作用する力として次式を得る。

$$\begin{aligned} F_s &= -C_s \ddot{X}_2 - k_s X_2 \\ &= C_s[(ab-1)\ddot{X}_G - ab\ddot{U}_u + \ddot{X}_s] \\ &\quad + k_s[(ab-1)X_G - abU_u + X_s] \quad (22) \end{aligned}$$

$$F_M = k_G(X_G - U_u) \quad (23)$$

$$R = a[F_k - bF_s] \quad (24)$$

ここで、 F_k は一次支持装置に働く力で、次式となる。

$$\begin{aligned} F_k &= -C_G \ddot{X}_1 - k X_1 \\ &= -C_G a \ddot{X}_G + C_G a \ddot{U}_u - k a X_G + k a U_u \quad (25) \end{aligned}$$

式(18)、(19)に式(22)～(25)を適用し、さらに式(17)を用いることにより本文の式(1)および式(2)が得られる。

式(18)と式(24)から F_s を消去すれば、次式を得る。

$$R = \{ab/(ab-1)\} m_c \ddot{X}_G - (aF_k + abF_M)/(ab-1) \quad (26)$$

式(26)に式(23)、(25)および式(17)を代入することにより本文の式(3)が得られる。

文 献

- (1) 野竹、機誌、92-845(1989)、96.
- (2) 梶野、アーバンインフラ・テクノロジー第1回講演論文集、(1989-9)、47.
- (3) Heidelberg, G., ほか2名、*Int. Conf. Maglev Transport*, (1984)、159.
- (4) Tsunashima, H., ほか2名、*Theoretical Appl. Mech.*, 39(1990)、75.
- (5) 永井・ほか1名、機論、45-400, C(1979)、1332.
- (6) 佐藤、鉄技研報告、549(1966).
- (7) 谷藤・ほか2名、機論、56-529, C(1990)、9.
- (8) Abe, M., ほか2名、*Proc. IMACS European Simulation Meeting*, (1990)、195.