UDC 629.45 : 621.335 : 621.318.14 : 519.71

論文

60-B8

軌道振動を考慮した吸引力形磁気浮上車両の制御理論に関する研究

正員 中川 聡 子 (横浜国立大)

正員 山村 昌 (工学院大)

1. はしがき

筆者らは、これまで常電導マグネットを用いた吸引力形磁気浮上車の研究を行ってきた。磁気浮上車はレールとの接触がないため騒音や振動の公害問題も少なく、車輪がないため走行時の摩擦もなく保守が容易であるという利点があることから、多方面での利用が期待される。

常電導磁気浮上システムに関する研究は、現在までのところ一点支持系の解析から始まり、二点支持系解析—台車(四点支持系)解析まで進んでいる。元来常電導マグネットを用いた磁気浮上系は不安定であるため適切な閉ループ制御が必要であるが、この支持系に最適制御の理論を用いることによって十分に安定した浮上特性が得られることが検証されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし実際の磁気浮上系は二台車、一車体で構成されているため、台車単独の制御の考え方では不十分である。そこで本論文では、前後の台車の二つの極端な場合を想定し、車両全体を見渡した制御法について説明を行っている。この制御法は三次系の制御に帰着することができるため、制御回路が簡単なうえ、浮上磁石はそれぞれ独立に制御を行なえる利点がある。また、軌道を車両が走行する場合、すなわち、可とうはりに順次移動荷重が加わる場合の解析も、軌道振動と浮上磁石の吸引力との相互作用の点で重要である。この場合、磁気浮上系と軌道との相互作用を考慮に入れた制御が必要であり、本論文で示した制御法を用いれば、軌道の防振を図ることが可能となることが示されている。

本論文では、まず二台車・一車体で構成される車両の制御法について述べ、次に軌道防振効果を目的とし

た制御法について述べ、それらについて走行シミュレーションの結果を例として示した。

2. 磁気浮上台車の最適制御理論

本論文において筆者らは、図1のような二台の磁気浮上台車に二次サスペンションを介して車体をのせた磁気浮上車両について解析を行なう。従来の鉄道ではボギー式台車が広く用いられているが、磁気浮上車にもこの台車方式を採用すると、乗り心地、曲線通過の点で利点があり、前後台車間の相互作用を少なくする働きを持たせることも可能である。

台車には、進行運動、上下運動、ローリング、ピッチング、ねじれ、左右動、ヨーイングの六つの運動モードがある。これらのモードの制御には、支持系として台車の四隅の浮上用マグネットと、案内系として左右四個のマグネットが用いられるが、支持系と案内系は台車の重心がその平面内の中心にあるとすれば、それぞれ独立に扱うことができる。本論文では、より複雑な支持系のみを解析するものとし、扱うモードは上下動(q)モード、ピッチング(φ)モード、ローリング(θ)モード、ねじれ(δ)モードとする。案内系については支持系と全く同様に扱えるため、本論文においては解析の対象としない。

さて、一台車の制御論は確立されており、台車の各運動モードは一点支持マグネットの制御理論と同様に扱うことができる⁽¹⁾⁽³⁾。しかも最適制御理論を用いて

図1 二台の台車に支持された車両モデル
Fig. 1: Model of vehicle body supported on two trucks.

Research for Electromagnetically Levitated Vehicle Running on Rails Considering Rail Oscillation. By Toshiko Nakagawa, Member (Yokohama National University) & Sakae Yamamura, Member (Kogakuin University).

中川聡子: 正員, 横浜国立大学工学部
山村 昌: 正員, 工学院大学工学部

図2 三次系閉ループブロック図

Fig. 2. 3-d degree close loop block diagram of models of motion of electromagnetically levitated vehicle.

図3 三次系閉ループブロック図

Fig. 3. 3-d degree close loop block diagram of models of motion of electromagnetically levitated vehicle.

各モードを制御し、相似制御の考え方を導入して各浮上マグネットを独立に制御できることが示されている。その手法として、各運動モードの閉ループブロック図は図2に示すような三次系であるから、モードごとの質量 m_0, m_θ, m_ϕ の平均質量 m_e に対して最適制御理論を用いて制御系を設計し、図3のような三つの独立したフィードバックループを持った閉ループ制御を行なうことである。

各 g, θ, ϕ, δ モードの状態変数は変換マトリクス T によって、台車の四隅にある各 a, b, c, d マグネットの状態変数に変換することができ、相似制御の考え方によって各マグネット間の相互作用をたち切ることができる。そのため、四隅のマグネットはそれぞれ独立に制御することができる。従って、制御信号として必要な状態変数は、 g, θ, ϕ, δ 系の変数ではなく、各マグネットごとの信号でよいから、制御回路は非常に簡素なものとなる。

運動モードごとの吸引力を $F_g, F_\theta, F_\phi, F_\delta$ とし、台車四隅のマグネットの吸引力を、 F_a, F_b, F_c, F_d とすると、これらの力の間の関係は(1)式のように表わされる。また、モードごとの電圧、電流、加速度、速度、位置などを表わす状態変数を $X_g, X_\theta, X_\phi, X_\delta$ に代表させマグネットの状態変数を X_a, X_b, X_c, X_d に代表させると、これらの関係は(2)式のように表わされる。その際の変換マトリクス T は(3)式のようなものである。

$$\begin{pmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \\ F_d \end{pmatrix} = T^{-1} \begin{pmatrix} F_g \\ F_\theta \\ F_\phi \\ F_\delta \end{pmatrix} = \frac{T}{4} \begin{pmatrix} F_g \\ F_\theta \\ F_\phi \\ F_\delta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{pmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \\ X_d \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} X_g \\ X_\theta \\ X_\phi \\ X_\delta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

3. 磁気浮上車両の制御

既に図1に示したように、磁気浮上車は二台の浮上台車を持っている。前節では一台車の制御方式について説明を行なったが、二台車と一車体で構成された磁気浮上車両の制御系の次数は8次となり、全体を最適に制御しようとする場合、8つのフィードバックが必要となる。このような制御を行なう場合、台車のみならず、車体にも制御用信号を得るためのセンサーが必要となることにもなり、しかも前後の台車の制御信号の交換も必要となるため、制御回路ははん雑となる。そのうえ、制御可能なシグナル数には実用上限度があり、後節で述べる軌道防振のために用いる制御用信号としても残しておかなければならない。このような観点から、前後台車はそれぞれ独立に、しかも簡素な制御を行なう必要が生じる。

さて、台車の制御特性を向上させると制御上のしゃ断周波数が大きくなり、軌道振動や外力などの種々の高い周波数の外乱に対しても追従できる。その結果、乗り心地が悪くなり、前後二台の台車に車体を直付けすることは望ましくない。台車、車体間には、1Hz程度の非常に低いしゃ断周波数を持つ二次サスペンションを介することにより、台車からの振動を車体へ伝えないフィルタの作用を持たせることが必要である。このような二次サスペンションを介することにより、前後二台の台車と車体の相互作用は次のような極端な二つの場合に近似して考えることが可能であり、実際の台車と車体の関係は、これら二つの場合の間に位置するものと考えてよい。

(i) 自由端の場合 図4のごとく台車の二次サスペンションの上端部が開放されて自由端と考えた場合に、二つの台車は相互の影響を受けずに進むため、この場合の制御は個々の台車の独立な制御で良く、2節に説明した図3のブロック図により制御系を設計す

図 4 自由端の場合

Fig. 4. Case of free end.

図 5 固定端の場合

Fig. 5. Case of fixed end.

図 6 三次系開ループブロック図(固定端)

Fig. 6. 3-d degree open loop block diagram (fixed end).

ることが可能である。この場合車体の質量がゼロの場合と等価と考えて良いことから、このような各台車独立な三次系の制御を、磁気浮上車両の自由端制御または質量ゼロの制御と呼ぶことにする。

(ii) 固定端の場合 図5ごとく前後台車の二次サスペンションが固定壁に接続された場合にも、二台の台車は相互の影響を受けずに進むため、これらの制御は個々の台車の独立な制御で良い。しかし、この場合にはマグネットの開ループブロック図は図6に示すものとなり、これによって制御系を設計することが可能である。この場合にも系は三次であるから三つの信号をフィードバックして制御を行なえばよい。この場合、車体の質量が無限大の場合と現象が等価となることから、このような各台車独立な三次系の制御を磁気浮上車両の固定端制御または無限大質量の制御と呼ぶことにする。

上記の2種類の手法で、図3、図6のブロック図中の最適なフィードバック定数 k_1, k_2, k_3 を最適制御理論から求める。そこで、自由端の系と固定端の系を状態方程式で表わすと、(4)、(5)式のようなものである。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{4R\gamma\beta}{m_e L_0} & \frac{4L_g\gamma\beta}{m_e L_0} & -\frac{R}{L_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{4\beta}{m_e L_0} \end{pmatrix} u \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{4R\gamma\beta - 4KR}{m_e L_0} & \frac{4L_g\gamma\beta - 4CR - 4L_0K}{m_e L_0} & -\frac{R}{L_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{4\beta}{m_e L_0} \end{pmatrix} u \quad \dots\dots\dots (5)$$

但し、状態変数 x はマグネットと対向面とのギャップ長の定常値からの変化分を表わしている。また、 u は系への入力で

$$u = -(k_1 x + k_2 \dot{x} + k_3 \ddot{x}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。 K, C は台車と車体の間にある二次サスペンションを表わすもので、 K はばね定数、 C ダンピング定数であって、自由端の系(4)式には含まれない。

このように、(4)、(5)式の系に対して、状態変数 $x, \dot{x}, \ddot{x}$ に対する重み q_1^2, q_2^2, q_3^2 とした(7)式のような評価関数 CF を定めてフィードバック定数 k_1, k_2, k_3 を定めると次のようになる。

$$CF = \int_0^\infty (q_1^2 x^2 + q_2^2 \dot{x}^2 + q_3^2 \ddot{x}^2) dt \quad \dots (7)$$

(i) 自由端の場合

$$k_1 = 1.8 \times 10^5, k_2 = 4.62 \times 10^3, k_3 = 7.21 \times 10$$

(ii) 固定端の場合

$$k_1 = 1.08 \times 10^5, k_2 = 4.60 \times 10^3, k_3 = 6.05 \times 10$$

但し、ここで用いた磁気浮上車両は表1に示すような質量をもち、断面 $3\text{m} \times 3\text{m}$ で 20m の車両長を有するもので、 1m^2 当り 19t の吸引力を持つ浮上用磁石を用いるとして、諸元を想定したものである。この諸元をもとに、上記、設計した系は、しゃ断周波数 $f_s = 8.3\text{Hz}$ 、減衰定数 $\zeta = 0.61$ となるように、(7)式の q_1^2, q_2^2, q_3^2 を定めている。

この結果から自由端と固定端の間で k_3 に 15% 程度の差は生じるものの、他の k_1, k_2 にはほとんど差はないことが判る。

さて、以上のような2種類のフィードバック制御を二台の台車にほどこし、図1のような車両を走行させた場合を考える。

図1に示したように、二次サスペンションは台車の左右端部の中央に一对設置されている。このような配置を行なうと台車のピッチングモードは車体には伝わらない。車両が走行する場合に必要な台車の運動

表 1 磁気浮上車両の諸元

Table 1. Dimensions of electromagnetically levitated vehicle.

記号		値
m_g	台車質量	4,000 kg
m_θ	台車ローリング等価質量	3,300 kg
m_φ	台車ピッチング等価質量	2,500 kg
m_s	モード平均質量	3,300 kg
x_0	軌道とマグネット間のギャップ長	12.0 mm
i_0	マグネット励磁電流	20.0 A
R	マグネット抵抗分	4.52 Ω
γ	$\gamma = i_0/x_0$	1,666.7 A/m
β	マグネットの吸引力の励磁電流に対する変化分	430.6 N/i
L_0	マグネットインダクタンス	2.989 H
L_g	マグネット漏れインダクタンス	0.448 H
l	台車長	5.0 m
L	車両の長さ	20.0 m
K	二次サスペンションばね定数	156,800 kg/s ²
C	二次サスペンションダンピング定数	36,000 kg/s ²
L_s	軌道の1スパン長	20.0 m
ζ_s	軌道の減衰率	3 %
f_s	軌道の固有振動数	10.0 Hz
M_s	軌道の1スパン質量	84,000 kg
M_g	車体質量	27,000 kg
M_θ	車体ローリング等価質量	13,000 kg
M_φ	車体ピッチング等価質量	9,100 kg

図 7 台車の運動モードと車体の運動モードの相互関係

Fig. 7. Interaction between mode of truck motion and mode of vehicle motion.

モードは、車体に伝わらない方が乗り心地などの点で有利である。このように二次サスペンションを設置すると、前後台車の各運動モードと車体の運動モードとの相互関係は図7に示すようなものとなる。また、これらの関係は(8)~(10)式で表わすことができる。ここで、 K と C は二次サスペンションのばね定数と減衰定数であり、 $W_\theta, W_\delta, W_\varphi, W_\delta$ は車体の各運動モードごとの定常位置からの変化分、 $M_\theta, M_\delta, M_\varphi, M_\delta$ は車

体の各運動モードの等価質量、 $Y_{\theta F}, Y_{\theta R}$ は前台車の上下動モードとローリングモードの定常位置からの変化分、 $Y_{\theta R}, Y_{\theta R}$ は後台車の上下動モードとローリングモードの定常位置からの変化分とする。また、 $F_{\theta F}, F_{\theta R}$ は前台車の上下動モード、ローリングモードの吸引力の定常値からの変化分であり、 $F_{\theta R}, F_{\theta R}$ は後台車の各モードの吸引力の定常値からの変化分である。また、車体のねじれに関しては、車体のねじれの減衰定数を C_δ 、ばね定数を K_δ としている。

$$\left. \begin{aligned} m_g S^2 Y_{\theta F} &= 2(K + CS) \\ &\quad \times (W_\theta + W_\varphi - Y_{\theta F}) - F_{\theta F} \\ m_\theta S^2 Y_{\theta F} &= 2(K + CS) \\ &\quad \times (W_\theta + W_\delta - Y_{\theta F}) - F_{\theta F} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} m_g S^2 Y_{\theta R} &= 2(K + CS) \\ &\quad \times (W_\theta + W_\varphi - Y_{\theta R}) - F_{\theta R} \\ m_\theta S^2 Y_{\theta R} &= 2(K + CS) \\ &\quad \times (W_\theta + W_\delta - Y_{\theta R}) - F_{\theta R} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} M_\theta S^2 W_\theta &= -2(K + CS) \\ &\quad \times (2W_\theta - Y_{\theta F} - Y_{\theta R}) \\ M_\theta S^2 W_\theta &= -2(K + CS) \\ &\quad \times (2W_\theta - Y_{\theta F} - Y_{\theta R}) \\ M_\varphi S^2 W_\varphi &= -2(K + CS) \\ &\quad \times (2W_\varphi - Y_{\theta F} - Y_{\theta R}) \\ (M_\delta S^2 + C_\delta S + K_\delta) W_\delta &= -2(K + CS)(2W_\delta - Y_{\theta F} + Y_{\theta R}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

図8(a)は1mmの軌道段差を車両が通過するとき

(a) 軌道段差と車両

(a) Model of vehicle and rail with difference in level.

(b) マグネット ab のギャップのステップ応答
(b) Step response of gap of magnet ab.

図 8

Fig. 8.

図 9 走行速度 - たわみ限度特性

Fig. 9. Curve of bending limit for velocity of electromagnetically levitated vehicle.

の様子を示したもので、走行速度は 80 m/s とする。図 8 (b) は、このときの前台車の前方 a, b マグネットの応答を抜き出したものであり、実線は台車が最適に応答した場合のものであり、破線は自由端制御、点線は固定端制御をそれぞれ台車、一台車の車両にほどこした場合の応答である。これらすべて段差に突入してから 0.2 秒後には完全に定常ギャップ 12 mm を保って走行している。また、三者の間には応答上の差はほとんどなく、このことから車体の乗った車両全体の制御に対しても、個々の台車のみを考えた三次系の制御で十分であることがわかる。これは、台車と車体間の二次サスペンションのカットオフ周波数が 1 Hz 程度と低いために、車体が台車の運動に与える影響が小さいからであるが、この周波数は実用されている値の範囲である。

図 9 は、三次系の制御を行なった場合、たわみのある軌道を走行させたときのギャップ長の応答の計算機シミュレーション結果から求めたたわみ許容限度をグラフにしたものである。たわみ許容限度とは、これ以上軌道をたわませるとマグネットが軌道に衝突するという限度のことである。実用域の走行速度（最高時速 300 km/h 程度）では、制御系のカットオフ周波数が高いほど、走行速度が遅いほどたわみ許容限度が大きく安全である。一般の軌道のたわみは 1 cm 程度であることから、たわみのみ考える場合には、この程度の制御で十分と考えられる。

4. 軌道を含む五次系の最適制御

前節までの解析で、車体も含めた磁気浮上台車の制御は、前後台車においてそれぞれ三つのフィードバックを各々の磁石に独立に行なうことで十分であること

が判ったが、この解析では軌道を弾性体として扱っていない。従って、磁気浮上車が実際の軌道上を走行する場合に振動を誘起するため、前節までの制御法では不十分である。軌道振動を防ぐためには軌道にコンクリートを埋め込むなどの策を構じなければならないがこのような手段には多くの建設費がかかる。そこで軌道構造を簡単化し、浮上磁石の吸引力の制御によって軌道防振機能をもたせることが必要となる。軌道の防振を図るには、軌道からの信号も制御対象としなければならないが、浮上体に取り付けられたギャップセンサや加速動センサの信号から等価的に把握することが可能である。本節では多点支持の場合の軌道も含めた五次の磁気浮上系を最適制御した場合、軌道特性が改善されることを示す。

前節の議論からも独立した個々の台車の制御法を用いれば車両全体の系の走行解析は十分であるから、ここでは一台の台車に注目する。このとき、軌道の慣性項を $M_z/2$ 、可とう性を表わすばね係数を k_z 、制動係数を C_z とした場合、動作点のまわりで線形化された式は (1) 式のようなものである。軌道の等価質量が、はりの全質量 M_z の半分となるのは、はりの力学などで示されることである。但し添字の $abcd$ は台車の四隅のマグネットを表わす。また各変数の位置関係は図 10 のようである。但し C_z は $2 \times \zeta_z \times \omega_z$ 、 k_z は ω_z^2 である。

$$\frac{M_z}{2} \times \frac{d^2 z_{mi}}{dt^2} = -k_z (z_{mi} - z_{ni})$$

図 10 可とう性をもったレールを含む基本モデル

Fig. 10. Basic model with flexible rail.

図 11 開ループ五次系ブロック線図

Fig. 11. 5-th degree open loop block diagram.

$$-C_z(\dot{z}_{mi}-\dot{z}_{ni})+f_{mi} \\ (i=a, b, c, d) \dots (11)$$

これらの式を用いて a, b, c, d マグネット系から $q, \theta, \varphi, \delta$ モード系への変換を変換行列 T を用いて行ない、図2のブロック図に組み込めば図11のような軌道も含めた五次系開ループブロック線図が描ける。この系を制御するための五つのフィードバック信号として $x_1, \dot{x}_1, z_1, \dot{z}_1, -i$ を選び、最適制御理論によってフィードバック係数 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 を設計する。設計に際しては入力 u として評価関数(12)式を設定する。

$$CF = \int_0^\infty (q_1^2 \dot{x}_1^2 + q_3^2 \dot{z}_1^2 + u^2) dt \dots (12)$$

$$u = -(k_1 x_1 + k_2 \dot{x}_1 + k_3 q_1 + k_4 \dot{z}_1 - k_5 i) \dots (13)$$

ここで、 q_3^2 は軌道防振のため付け加えられた重み付け定数である。

種々の重み q_3^2 について表1のような軌道に対し、最適なフィードバック系を作った場合、系の極の位置

図12 最適制御を行なった五次モデルの特性
Fig. 12. Characteristics of 5-th degree model with optimum control.

図13 五次系フィードバック制御を行なう場合の軌道の周波数特性
Fig. 13. Frequency characteristics of rail oscillation (5-th degree feed back control).

からその系の制御特性が判断できる。図12は、重み q_3^2 に対して系のカットオフ周波数 f_c 、減衰定数 ζ_c 、軌道の固有振動数 f_z 、ダンピング係数 ζ_z を計算したものである。図12からも判るように、浮上特性の良否を左右する ζ_c や f_c が大きく劣化しない領域で、軌道が本来もつ非常に低いダンピング定数を制御によって1けた程度増加させることも可能となる。

このように軌道も含めた五次系(図11)に $k_1 \sim k_5$ までのフィードバック制御を行なうと、レールへの外力に対するたわみの周波数特性は図13のようになる。横軸は軌道の固有振動数(ここでは10 Hz)で規格化しており、縦軸は静荷重を加えた場合のたわみで規格化している。このように、制御を行なえば軌道の固有振動数と同じ周波数の外乱を受けたときに起こる共振ピークをなだからにすることが可能となる。但し、軌道スパン20mで、固有振動数10Hzの場合、秒速200mで走行する場合以外は、走行による共振状態は起きないから実用範囲での心配はないと言える。

5. はりの力学と走行シミュレーション

磁気浮上車両が軌道上を走行する場合、浮上用マグネットの吸引力による荷重が軌道としてのはりにかかる。この荷重は速度 V を持つ移動荷重であり、しかも、浮上マグネットが台車の前後部に分かれているため、一車両にははりに対し四つの荷重の作用点が存在する。はりの振動の一つの荷重点に対して線形と考えて良いため、はりの運動は各移動荷重点による運動の和として求められる。

図14に軌道を示す。 L はスパン長、 P_0 は荷重、 M_z は軌道質量、 V は走行速度、 ζ_z は軌道の減衰比、 ω_z は軌道の固有角速度、 X は軌道端からの距離とすると軌道振動 Z は(14)式のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{Q} + 2\zeta_z \omega_z \dot{Q} + \omega_z^2 Q \\ = (2P_0/M_z) * \sin(V\pi/L) \\ \phi(X) = \sin(\pi X/L) \\ Z = Q(t)\phi(X) \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

(14)式の第1式を解けば、(15)式のようになる。

P_0 : 荷重
 X : はり始点から荷重までの距離

図14 荷重の加わったはりのモデル
Fig. 14. Model of rail with load.

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= C_1 \exp(-\zeta_z \omega_z t) * \sin b t \\ &\quad + C_2 \exp(-\zeta_z \omega_z t) \cos b t \\ &\quad + E_1 \sin(a t + \delta) \\ Z &= Q(t) \sin(\pi X/L) \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

但し、

$$\begin{aligned} E_1 &= 2 P_0 / (M_z * \sqrt{(\omega_z^2 - a^2)^2 + 4 \zeta_z^2 \omega_z^2 a^2}) \\ C_1 &= -E_1 (\zeta_z \omega_z \sin \delta + \pi V/L * \cos \delta) / b \\ C_2 &= -E_1 \sin \delta, \quad a = \pi V/L, \\ b &= \sqrt{\omega_z^2 - \zeta_z^2 \omega_z^2} \\ \delta &= \tan^{-1}(2 \zeta_z \omega_z / (\omega_z^2 - a^2)) \end{aligned}$$

とする。はりに N 個の移動荷重が加わる場合を考え
ると、 i 番目の荷重がはりに進入してから時間を t_i
とすれば軌道端から X の地点のはりの振動の(16)式
のように合成される。

$$Z = \sum_{i=1}^N Q(t_i) * \sin(\pi X/L) \dots (16)$$

荷重 P_0 は 1 荷重点当たりの車両質量と台車左右 2
個のマグネットの吸引力の変化分の和となり、二台車
一車体の浮上システムに上記(15)、(16)式を組み合わ
せることでシミュレーションを行なうことができる。
浮上システムの諸元は表 1 に示すものとしてシミュレ
ーションを行なえば、図 15、図 16 の如くなる。

図 15 は一車両は走行させる場合の走行速度 V と

図 15 走行速度と最
短ギャップ長

Fig. 15. Curve of the shortest value of
gap for velocity.

図 16 制御による軌
道の等価減衰
比と最短ギャ
ップ長

Fig. 16. Curve of the shortest value of
gap for damping constant with optimum
control.

最短ギャップ長を示すものである。最短ギャップ長と
は定常 12 mm のギャップに対し走行中にマグネットが
軌道に最も引き寄せられたときのギャップ長のことで
ある。制御系は五次系でカットオフ周波数 8.1 Hz、
減衰率 0.6、軌道の振動数 10.0 Hz 制御によって得
られる軌道の等価減衰率である。

図 15 は、第 4 節で述べた五次系の制御を行なった
場合の最短ギャップ長と減衰定数の関係を示すもので
ある。五次系の制御法は軌道の減衰率を増加させる働
きがあるため、その制御上の等価的な減衰率を横軸に
とっている。走行速度によって、大きな差異はみられ
ないことがわかる。

これらの結果から、使用しうる走行速度 (最高時速
300 km/h 程度) の領域では、軌道とマグネットの衝突
は十分の余裕をもって起こらないことがわかる。また、
五次系フィードバック制御の制御定数を適切に選
べば非常に安定した走行が可能となることがわかる。

6. む す び

本論文は、磁気浮上車両と軌道を含めた系の制御系
について述べ、その計算機シミュレーションを行なっ
たものである。磁気浮上車両の制御は台車方式を採用
すると、一台車のみに注目した制御法で十分であるこ
とが示された。また、車両走行に際しての軌道振動を
防ぐには五次系の制御を行なえばよく、車両が走行し
ている間 (制御が効いている間) は、軌道の減衰率は
制御によって大きくとれ、防振効果を持たせることが
可能であることがわかった。そうすることによって、
300 km/h 以上の実用範囲内の速度で走行しても軌道
の固有振動数などによる影響はないと考えられる。本
論文は磁気浮上車両の浮上系の設計に対して、台車間
の相互作用を考慮した制御法、浮上磁石の独立制御法
建設費の大部分を占める軌道の防振法等々の基本方針
を総括的に述べたものとする。

最後に、本研究を行なうに当たり横浜国立大学 芹沢
康夫教授に貴重など意見をいただき、心より感謝いた
します。 (昭和 59 年 4 月 20 日受付)

文 献

- (1) 大西・山村・林:「吸引電磁石形磁気浮上方式の最適制御」
電学論 B 98, 387 (昭 53-4)
- (2) 中川・山村・大西:「磁気浮上台車の制御理論と実験」昭 56
電気学会大会 No. 794
- (3) 山村・大西・正田:「吸引力形常電導磁気浮上台車の制御系
理論」電学論 B 99, 752 (昭 54-11)
- (4) 山村・大西・中川:「吸引力形磁気浮上台車の集合制御と独
立制御」電学論 B 101, 109 (昭 56-2)