吸引形磁気浮上車の制御と走行特性

東京大学 山村 昌
東京大学 阿部 茂

1. ま え が き

吸引形磁気浮上方式は、従来の鉄道以上の高速を低騒音、低振動で実現できるだけでなく、保守も軽減できる可能性があり、次の世代の交通として期待されている。このため各国で開発が進められており、我が国でも各方面で研究が行なわれている。

吸引形磁気浮上方式は最初、フィードバック制御の安定性や高速域でのブレーキ力といった基本的な問題が懸念されていたが、本質的な問題でないことが理論的にも実験的にも次第に明らかになってきた^{(1)~(10)}。しかし実際の走行車用の浮上制御となると未だ十分な検討がなされていなかった。走行車の特性は軌道の影響をまともに受けるので、軌道の状態も含めて制御系を考える必要がある。

本論文では、軌道精度を Power Spectral Density で表す手法を用い、Active Suspension である吸引形磁気浮上方式の特長を生かしながら、制御回路を合成する方法を紹介する。制御回路の入力には加速度計をも利用しているため、系の安定性を保ちながら軌道の凹凸による車両振動を抑えることが可能である。このため比較的低速用の車両では2次サスペンションを用いなくても十分な乗り心地が得られる。また、この合成法は2次サスペンションのついた高速用車両にも適用できる。制御回路の合成法が示されれば、吸引形磁気浮上車の走行特性を計算によって求め、未来の浮上車像を明らかにすることができる。

第1図 基本モデル

Fig. 1. Basic model.

2. 制御モデル⁽⁶⁾

吸引形磁気浮上の基本モデルとして第1図のような1点支持モデルを考える。この系は次の(1)~(3)式が成立する非線形系であるが、動作点の近傍では線形系として扱うことが可能である。各変数の動作点での値には下添字0を、その変化分には下添字1をつけて表わし、変化分のラプラス変換は大文字で表わすことにする。

$$f_m = \alpha \left(\frac{\dot{x}}{x} \right)^2, \quad \alpha = \frac{\mu_0 n^2 S_F}{4} \dots \dots \dots (1)$$

$$e = R i + \frac{d(Li)}{dt}, \quad L = L_a + \frac{L_b}{x} \dots \dots \dots (2)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = mg l_0 + \Delta N - f_m l_0 \dots \dots \dots (3)$$

$$(J = m_e l_0^2, \Delta N = f_{ex} l_0, x_1 = \theta l_0, f_{m0} = mg)$$

ここで、 i : 電磁石コイルの電流、 x : ギャップの長さ、 μ_0 : 空気の透磁率、 n : コイルの巻数、 S_F : 鉄心端面の面積、 e : コイルの端子電圧、 R : コイルの抵抗、 L : コイルのインダクタンス、 J : O点まわりの慣性モーメント、 θ : 回転角、 mg : 吸引点(P点)での重力、 ΔN : 外乱(回転モーメント)、 m_e : 慣性等価

Control and Speed-Characteristics of Magnetically Levitated Vehicles of Attracting Magnet Type. By Sakae Yamamura, Member & Shigeru Abe, Associate (Electrical Engineering Department Faculty of Engineering, University of Tokyo)

山村 昌: 正員, 東京大学工学部電気工学科
阿部 茂: 正員, 東京大学工学部電気工学科

第 2 図 一般的な浮上モデルの座標

Fig. 2. Coordinates of general levitation model.

第 3 図 一般的な浮上モデルの構成線図

Fig. 3. Block diagram of general levitation model.

質量。

車両が軌道に沿って走行する場合には軌道の凹凸があるので、車両の運動を第 2 図のような絶対座標で考える必要がある。電磁石の位置を y 、軌道面位置を z で表わせば、ギャップの長さ x は (4) 式で表わされる。

$$x = y - z \quad \dots\dots\dots (4)$$

(1)～(4)式で表わされるこの系は本来不安定である。ここでは安定化のためにギャップの長さ、電流のフィードバックの他に加速度計の利用を考える。

以上をまとめて構成図で示したのが第 3 図である。第 3 図より外力 f_{ex} 、軌道 z 、設定値 x_{r1} から電磁石の位置 y_1 への伝達関数が次式で表わされる。

$$Y(S) = T_1(S)F_{ex}(S) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Y(S) = T_2(S)Z(S) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Y(S) = T_3(S)X_r(S) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$T_1(S) = \frac{1}{m_e} \left(S + \frac{R'}{L_0} \right) / D(S) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$T_2(S) = \frac{\beta}{L_0 m_e} \left\{ G_x' - \frac{i_0}{x_0} (L_a S + R') \right\} / D(S) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$T_3(S) = \frac{\beta}{L_0 m_e} \left\{ G_x' - \frac{i_0}{x_0} R' \right\} / D(S) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$D(S) = s^2 \left(s + \frac{R'}{L_0} \right) + \frac{\beta}{L_0 m_e} \left\{ G_x' + s^2 G_a \right.$$

$$\left. - \frac{i_0}{x_0} (L_a s + R') \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

3. Power Spectral Density による走行特性の解析⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

車両の走行性を解析する手法に、Power Spectral Density (PSD) を用いる方法がある。この手法を吸引形磁気浮上車に用いれば、軌道凹凸の PSD と磁気浮上車の各種伝達関数とから、走行時の乗り心地、軌道との接触確率、制御電力といった特性を求めることができる。また、得られた結果をもとに、実際必要な電源容量や軌道精度を逆に求めることもできる。

軌道の凹凸は PSD にらって (12) 式の形で表わされることが経験的に知られている。

$$\bar{Z}^2 = \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \Phi_z(\Omega) d\Omega, \quad \Phi_z(\Omega) = \frac{A}{\Omega^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $\bar{Z}^2$: 軌道凹凸の 2 乗平均、 Ω : 波数、 $\Phi_z(\Omega)$: 軌道凹凸の PSD、 A : 軌道精度指数、 Ω_2, Ω_1 : 波数の上限および下限

である。

角周波数 ω を用いれば、(12) 式は速度を v として、(13) 式で表わすことができる。

$$\bar{Z}^2 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \Phi_z(\omega) d\omega, \quad \Phi_z(\omega) = \frac{A v}{\omega^2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

A の値としては溶接レールの場合、 $1.88 \times 10^{-7} \text{m} \sim 6 \times 10^{-7} \text{m}$ が用いられている^{(12)～(14)}。

ギャップの長さの変位 x_1 の分散は (4)、(6) 式より、(14) 式で表わすことができる。

$$\bar{x}_1^2 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |T_2(j\omega) - 1|^2 \Phi_z(\omega) d\omega, \quad \sigma_x = \sqrt{\bar{x}_1^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

z は平均値 0 の正規分布をなすことが知られているので、 x_1 も平均値 0 の正規分布をなすと考えられ、 x_1 の標準偏差 σ_x とギャップの設定値 $x_r (= x_0)$ とを比較することにより、接触確率を求めることができる。

車両の加速度 $\ddot{y}_1$ の PSD $\Phi_{\ddot{y}_1}(\omega)$ は (6) 式より、

$$\Phi_{\ddot{y}_1}(\omega) = \omega^4 |T_2(j\omega)|^2 \Phi_z(\omega) \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表わされ、第 4 図のような $\Phi_{\ddot{y}_1}(\omega)$ による乗り心地基準と比較することにより、乗り心地を評価することができる。

電磁石の端子電圧変化 e_1 や電流変化 i_1 の 2 乗平均からは (16)、(17) 式によって制御の皮相電力 P_{app} 、有効電力 P が求まり、 e_1, i_1 の標準偏差 σ_e, σ_i は電源容量を決める参考となる。

$$P_{app} = (e_o^2 + \bar{e}_1^2)^{1/2} (i_o^2 + \bar{i}_1^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

第4図 郊外用空気浮上車の乗り心地基準

Fig. 4. Urban TACV ride quality specification.

$$P = (i_0^2 + i_1^2)R \quad (17)$$

4. 制御回路の設計

〈4.1〉 非接触条件と乗り心地基準

吸引形磁気浮上車のような軌道車では、車両の軌道への追従性と乗り心地という相反する2つの面から車両支持系を考えねばならない。吸引形の場合浮上ギャップ長が大きくないため、軌道への追従性がよくないと軌道との接触が起きる可能性がある。軌道との接触は危険なことではないが、軌道や電磁石の摩耗を防ぎ乗客に不快感を与えないためにも接触が起こらないようにすべきである。接触を防ぐため軌道への追従性をよくすると乗り心地は悪くなる。

第3章の解析法を用いて、軌道との非接触条件を求めてみよう。吸引形の場合後で述べるように、軌道から車両への伝達関数 $T_2(S)$ をダンピングの良いダンピング・ファクター $=\sqrt{2}/2$ の2次系に近づけることができる。いま、 $T_2(S)$ を(18)式で近似すれば、(14)式から σ_x を求めることができる⁽²¹⁾。

$$T_2(S) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_n s + \omega_n^2} \quad (18)$$

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty |T_2(j\omega) - 1|^2 \frac{Av}{\omega^2} d\omega = \frac{3}{4\sqrt{2}} \frac{Av}{f_n}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (19)$$

ギャップの長さ x_0 を $3\sigma_x$ 以上にとると、実用上非接触が保証されることになる。このためには(19)式で $3\sigma_x = x_0$ とすると、 f_n を次のように選ぶ必要がある。

$$f_n \geq 4.77 Av / x_0^2 \quad (20)$$

次に乗り心地を考えよう。(18)式で表わされる2次系の ϕ_f は第5図のように $f = f_n$ で折れる折れ線③で近似できる。したがって、乗り心地基準を満たす最大 f_n は、この折れ線がA点を通る場合に与えられ

(a) 二次サスペンションのない時 (b) 二次サスペンションのある時

第5図 乗り心地基準を満たす軌道応答の形

Fig. 5. Guideway response which satisfies ride quality specification.

第6図 非接触条件と乗り心地基準の f_n による表現

Fig. 6. Noncontact condition and ride quality specification in terms of f_n .

(21)式で表わすことができる。

$$f_n \leq \sqrt[4]{349 \times 10^{-6} / Av} \quad (21)$$

(20), (21) 式の関係を示したのが第6図である。この図からギャップの長さ $x_{0g} = 10\text{mm}$ の場合でも、 $f_n = 1.75\text{Hz}$ に選べば、 $A = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}$ の軌道を 36m/s の速度で走ることがわかる。なお突風等外力が加わっても、非接触条件が満たされるようにするには x_{0g} をギャップの長さ x_0 よりやや小さめに選べばよい。

〈4.2〉 制御回路の合成⁽¹⁵⁾ 前節の結果をもとに外力応答も考慮して、 $T_1(S)$, $T_2(S)$ の仕様を次のように決めよう。

- (a) $1g$ の外力によるオフセット $= x_0/\gamma$
- (b) Step 外力によるオーバーシュート $< 30\%$
- (c) $T_2(S)$ は第6図より決まる f_n をもつ2次系に近い。
- (d) $T_2(S)$ の周波数応答の共振値 M_r は十分1に

近い。

系をダンピング・ファクター $=\sqrt{2}/2$ の2次系に近づけるため、(22)式のような代表根 γ_1, γ_2 を考える。 x_0 が決まれば第6図から f_n, q が求まる。

$$r_1, r_2 = -q \pm j q, \quad f_n = \frac{\sqrt{2} q}{2\pi} \dots\dots\dots (22)$$

系を任意の特性にもってゆくには電磁石の位置 y 、加速度 $\ddot{y}$ のほか、速度 $\dot{y}$ をもフィードバックする必要がある。それには G_x を位相進み補償にするか、 G_a を位相遅れ補償にすればよい。そこで G_x, G_a を(23)式のようにおく。

$$G_x = k_x \frac{(s + Z_x)}{(s + P_x)}, \quad G_a = k_a \frac{(s + Z_a)}{(s + P_a)} \dots\dots (23)$$

(23)式を(8),(9)式に代入してみよう。ここでは、とりあえず $L_a = 0$ と仮定する。 $T_2(S)$ を(18)式のような2次系に近づけるには、 G_x は位相進み補償でなく比例補償に近い方がよい。つまり $P_x \approx Z_x$ であればよい。また、代表根の近くに零点があると減衰特性が悪くなるので R'/L_0 は q より十分大きくしなければならない。 P_a が大きいと G_a を位相遅れ補償にすることができない。しかし P_a が特性方程式 $D(S)$ の根と打ち消し合うようにすれば、 P_a を小さくすることができる。そこで、

$$G_x' + s^2 G_a = k_x' \frac{(s + Z_x')}{(s + P)} + k_a s^2 \frac{(s + Z_a)}{(s + P)} \\ = k_a (s^2 + C_1 s + C_2) \dots\dots\dots (24)$$

とおく。代表根が r_1, r_2 であるから、

$$D(S) = (s^2 + 2q s + 2q^2)(s + r_3) \dots\dots\dots (25)$$

となる。(c)の条件から $r_3 > q$ でなければならない。

Off-setの条件(a)から、

$$G_x'(0) = \left(1 + \frac{\gamma m_e}{2m}\right) \frac{i_0}{x_0} R' \dots\dots\dots (26)$$

が得られる。普通は $m_e = m$ である。(24)式を(11)式に代入後、(25)式と係数比較し、(26)式を用いれば、次の手順で各定数を求めることができる。

- (1) $f_n \rightarrow q, R'/L_0$ を決める ($R'/L_0 > q$)。
- (2) r_3, k_a, C_1, C_2 が求まる。
- (3) P を十分小さく決める (例えば $P=1$)。
- (4) Z_a, k_x', Z_x' が求まる。

P を十分小さく決めると $Z_x \approx P$ となり、 G_x' を比例補償にすることができる。この結果、次のような補償回路が得られる。

$$\left. \begin{aligned} G_a &= k_a \frac{(s + Z_a)}{(s + P)}, \quad G_x = k_x' - R' \frac{i_0}{x_0} \\ K_x &= R' \frac{i_0}{x_0}, \quad K_i = R' - R \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

(9)式を見れば、 $\omega > \omega_a$ で L_a の影響が無視できなくなり、周波数応答の垂下特性が悪くなる。したがって第5図(a)より f_a が6Hz以下の時は乗り心地が悪くなるので、電流のフィードバックを強め、 R' を大きくする必要がある。

$$\omega_a = \frac{\gamma m_e R'}{Z m L_a}, \quad f_a = \frac{\omega_a}{2\pi} \dots\dots\dots (28)$$

5. 1点支持実験

第1図に似た実験装置で、制御特性の確認を行なった。実験定数を第1表に示す。電磁石の外形寸法および磁化特性は第7図のとおりである。この電磁石の鉄心は積層してあるが、軌道にあたる鉄は積層していない。

第1表 1点支持の実験定数

Table 1. Parameters for one-point-support.

$n = 1.84 \times 10^3$	$L_0/R = 0.150 \text{ s}$
$S_F = 6.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$m = 35 \text{ kg}$
$\alpha = 6.65 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^3/\text{A}^2 \cdot \text{s}^2$	$m_e = 35 \text{ kg}$
$L_a = 1.85 \text{ H}$	$x_0 = 10.0 \text{ mm}$
$L_b = 0.93 \text{ H} \cdot \text{cm}$	$i_0 = 2.27 \text{ A}$
$L_0 = 2.78 \text{ H}$	$\beta = 302 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{A} \cdot \text{s}^2$
$R = 18.5 \Omega$	$P = 95 \text{ W}$

第7図 電磁石の寸法および磁化特性

Fig. 7. Dimensions magnetization characteristics of electromagnet.

第 8 図 1 点支持実験の補償回路

Fig. 8. Compensating circuit of one-point-support experiments.

(注) 磁束密度の値は測定位置によって多少変化する。図では理論値を 0.86 倍して点線で示した。

第 9 図 外力に対する応答

Fig. 9. Response to external force.

い。

第 4 章の設計法により、 $q=10$ 、 $R'/L_0=20$ 、 $P=1$ 、として補償回路を求めたところ、第 8 図の補償回路を得た。この浮上系の特性を、Step 外力応答および設定値変更の周波数応答によって調べてみたところ、第 9 図、第 10 図のような結果が得られた。これらを見れば、この浮上系が(a)~(d)の仕様を満たし、理論値ともよく一致していることがわかる。

6. 吸引形磁気浮上車の走行特性

磁気浮上車の走行特性を調べるため、乗用車の効分の大きさをもつ第 11 図のような浮上車モデルを考えよう。この浮上車の電磁石として、第 7 図の電磁石を長さ方向に 3 倍伸ばしたものを考える。この電磁石の定数は第 1 表から計算で求め、第 2 表のようになる。鉄磁路の幅が 25 mm と狭いため、ギャップの長さ 10 mm で吸引力自重比が 8、消費電力が 3 kW/t となっているが、実用の大型車両では鉄磁路の幅が 40 mm 程度となり、ギャップの長さを 15 mm にしても上と同じ吸引力自重比 8、消費電力 3 kW/t 程度の

第 10 図 設定値変更に対する応答

Fig. 10. Responses to change of setting.

第 11 図 浮上車モデル

Fig. 11. Levitation vehicle model.

第 2 表 浮上車モデル用電磁石の定数

Table 2. Parameters of levitation vehicle model magnet.

吸引力	$m=640$ kg	電 流	$i_0=11.3$ A
総重量	80 kg	巻線抵抗	$R=15\Omega$
(鉄心重量)	55 kg	インダクタンス	$L_a=1.39$ H
鉄心の長さ	75 cm		$L_b=0.70$ H·cm
ギャップの長さ	$x_0=10$ mm		$L_0=2.09$ H
磁束密度	0.65 T	消費電力	1.89 kW
巻 数	$n=920$	電磁石の定数	$\alpha=4.99 \times 10^{-3}$ kg·m ³ /A ² S ²

性能が得られる。

第 6 図から $x_{0g}=7$ mm とすると、 $f_n=2$ Hz に選ぶことにより、 $Av=20 \times 10^{-6}$ m²/s の走行が可能となる。第 4 章の設計法により、 $R'/L_0=20$ として補償回路を求めると、第 12 図(a)の補償回路が得ら

(a) 二次サスペンションのない場合

(b) 二次サスペンションのある場合

第 12 図 浮上車モデルの補償回路

Fig. 12. Compensating circuit for levitation vehicle model.

第 13 図 浮上車モデルの ϕ_y Fig. 13. ϕ_y for levitation vehicle model.

第 3 表 浮上車モデルの走行特性

Table 3. Running characteristics of levitation vehicle model.

$3\sigma_x = 8.85 \text{ mm}$ (7.61 mm)	$3\sigma_b = 0.047 \text{ T}$ (0.036 T)
$\sigma_y = 0.0485 \text{ g}$ (0.0378 g)	$P_0 = 1.89 \text{ kW}$
$3\sigma_e = 505 \text{ V}$ (632 V)	$P_{app} = 2.79 \text{ kVA}$ (3.13 kW)
$3\sigma_i = 10.2 \text{ A}$ (8.81 A)	$P = 2.06 \text{ kW}$ (2.02 kW)

注 1. $Av = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

注 2. 積分範囲: 0.1~200 Hz

注 3. このモデルでは $R'/L_0 = 20$ であるが、() 内は $R'/L_0 = 40$ として補償回路を作った時の値である。

注 4. 上の値は電磁石 1 個についての値である。

れる。 $Av = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ として、この浮上車の走行特性を調べたところ、第 13 図、第 3 表のような結果が得られた。 ϕ_y や $3\sigma_x$ が目標より少し大きくなって

いるのは、 $T_2(S)$ の垂下特性が十分でないからである。 R' を大きくすれば ϕ_y や $3\sigma_x$ は小さくなるが、 σ_e はかえって大きくなる。第 3 表では $\sigma_e \approx R_{i0}$ のため電源の出力最大電圧は $4R_{i0}$ になるが、実際には電源を多少飽和させても σ_x , σ_i 等の特性に大きな変化は現われないので⁽²²⁾、出力最大電圧は $3R_{i0}$ もあれば十分である。また $3\sigma_i < i_0$ であるため電流の方向が逆転する可能性はほとんどなく、電源の出力最大電流も走行特性だけを考えれば $2i_0$ 程度でよい。励磁損失 P_0 に比べ皮相電力 P_{app} は少し大きい、消費電力はわずかに大きいだけであり、制御によって失われる電力は極くわずかである。これは予想されたことであって、制御電源に回生機能が必要なことを示している。

このようにギャップの長さが 10 mm の場合でも、新幹線並の軌道精度 ($A = 0.7 \times 10^{-6} \text{ m}$) さえ得られれば、100 km/h 程度の速度が得られ、浮上用電力もわずかで済むことが示された。吸引形では 15~20 mm のギャップの長さは容易に得られるので、良い軌道精度さえ得られれば、2 次サスペンションがなくても、200 km/h 程度で走ることが可能である。

7. 2 次サスペンション

さらに高速で走るためには 2 次サスペンションが必要である。2 次サスペンションをつけば吸引浮上系で乗り心地基準を満たす必要がなくなり、吸引浮上系の f_{n1} は非接触条件が満たされるように決めればよい。しかし f_{n1} に比例して大きな浮上電源が必要となるため、 f_{n1} は必要最小限の値に決めるべきである。

第 14 図のようにスプリングとダンパーからなる 2 次サスペンションを考え、図のように座標をとると、(29)、(30) 式が成立する。

第 14 図 2 次サスペンション付浮上モデルの座標

Fig. 14. Coordinates of levitation model with secondary suspension.

第 15 図 2 次サスペンション系の構成線図

Fig. 15. Block diagram of secondary suspension system.

$$m_1 \ddot{y}_1 = k_s(y_2 - y_1) + C_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - f_{m1} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 = f_{ex} - k_s(y_2 - y_1) - C_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \quad \dots\dots\dots (30)$$

ここで、 m_1 : ばね下重量 (浮上用および案内用電磁石, リニア誘導電動機等), m_2 : ばね上重量 (車室, 電源等)

第 2 章の制御モデルと比べてみると, 2 次サスペンションがつくことにより, 第 3 図の構成図の一部が第 15 図のように変わることがわかる。 y_1 から y_2 への伝達関数を求めてみよう。(30) 式で $f_{ex}=0$ とおくと,

$$\left. \begin{aligned} Y_2(S) &= \frac{C_s s + k_s}{m_2 s^2 + C_s s + k_s} Y_1(S) \\ f_{n2} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

となり, 2 次サスペンションをつけても新たに 20dB/decade の減衰特性が得られるにすぎない。低い周波数では $Y_1(S)/Z(S)=1$ のため, $\Phi_{\ddot{y}_2}(\omega)$ は第 5 図(b)の折れ線④で近似できる。従って乗り心地基準が満たされるようにするには折れ線④が A 点の下を通るように f_{n2} を決めればよい。次に軌道応答 $T_2(S)$ を見ると, $K_2 \rightarrow G_4 K_2$ と変化するだけである。2 次サスペンションのない時の等価質量 m_e は全重量 $m_1 + m_2$ に等しかったが, 2 次サスペンションのある時は第 16 図より, 吸引浮上系で扱う周波数では, m_e はばね下重量 m_1 と考えてよい。したがって, 2 次サスペンションのある場合には〈4・2〉節の設計法で $m_e = m_1$ として補償回路を求めればよい。

第 11 図の浮上車モデルについて, $m_2/m_1=3$ として制御系を考えたところ, 第 12 図(b)のような補償回路を得た。計算によって浮上車の走行特性を求めたところ, 第 17 図および第 4 表のような結果を得た。これらを見れば 2 次サスペンションをつけることによって, $Av=60 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ と前の 3 倍もの速度が得ら

第 16 図 $G_4 K_2$ の周波数応答

Fig. 16. Frequency response of $G_4 K_2$.

第 17 図 2 次サスペンション付浮上車モデルの $\Phi_{\ddot{y}}$

Fig. 17. $\Phi_{\ddot{y}}$ for levitation vehicle model with secondary suspension.

第 4 表 2 次サスペンション付浮上車モデルの走行特性

Table 4. Running characteristics of levitation vehicle model with secondary suspension.

$3\sigma_{x1}=8.53 \text{ mm}$	$\sigma_{y2}=0.0188 \text{ g}$
$\sigma_{\dot{y}_1}=0.456 \text{ g}$	$P_0=1.89 \text{ kW}$
$3\sigma_e=1,130 \text{ V}$	$P_{app}=4.85 \text{ kVA}$
$3\sigma_i=10.6 \text{ A}$	$P=2.08 \text{ kW}$
$3\sigma_b=0.111 \text{ T}$	$P_{dumper}=6.16 \text{ W}$
$3\sigma_{x2}=19.9 \text{ mm}$	

注 1. $f_{n1}=10 \text{ Hz}$, $f_{n2}=0.4 \text{ Hz}$, $\zeta_1=0.707$, $\zeta_2=0.5$,

$m_2/m_1=3$, $R'/L_0=60$

注 2. $Av=60 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

注 3. 積分範囲: $0.1 \sim 200 \text{ Hz}$

注 4. 上の値は電磁石 1 個についての値である。

れることがわかる。また, σ_x が相対的に小さくなった反面, 当然のことながら, σ_e が大きくなっている。

8. あとがき

本論文では軌道精度を PSD で表わし、吸引形磁気浮上に適したサスペンション特性を求め、これを満たす制御系の設計法を提案するとともに実験によってその特性の確認を行なった。この設計法は電磁石の大小によらず希望の特性を示す制御系を設計することが可能である。さらに重量 5t の浮上車モデルを使って走行特性の計算を行なった結果、2 次サスペンションをつけなくても 100~200 km/h の走行が可能であり、2 次サスペンションをつければさらに 3 倍もの速度で走れることがわかった。そのほか、電力消費や電源容量についても具体的な数値例を示した。これによって将来の磁気浮上実用車の姿が多少なりとも明らかになったと信ずる。本論文が吸引形磁気浮上車開発の参考となれば幸いである。

最後に、有益な助言をいただいた林 武人助手、横浜国立大学 塚本助教授、実験および理論計算に協力いただいた卒論生の岩滝雅人君、高島 誠君に感謝の意を表します。(昭和 50 年 3 月 6 日受付)

文 献

- (1) 山村・塚本：昭 46 電氣学会全国大会 No. 785
- (2) 山村・阿部・林：昭 48 電氣学会全国大会 No. 897
- (3) 山村・阿部・林：昭 49 電氣学会全国大会 No. 731
- (4) 塚本：昭 49 電氣学会全国大会 No. 735
- (5) 山村・阿部：昭 49 電氣学会全国大会 S-8-2
- (6) 山村・阿部・林：電氣学会論文誌 94-B, 255 (昭 49-5)
- (7) 松村・山田：同上 94-B, 567 (昭 49-11)
- (8) G. Bohn, et al.: Fourth International Cryogenic Engineering Conference, Mai 1972
- (9) 山村・伊藤：電氣学会研究会資料 RM-74-4 (昭 49-11)
- (10) R. H. Borcherts & L. C. Davis: IEEE Trans. Magnetics MAG-10, p. 425 (1974)
- (11) D. F. Wilkie & R. H. Borcherts: ASME 73-ICT-17 (1973)
- (12) S. G. Meisenholder & T. C. Wang: TRW Systems Group, Report No. 06818-6052-R0-00 (1972)
- (13) J. W. Young & D. N. Wormley: ASME Trans. Series G, 95, 2, 213 (1973)
- (14) R. M. Katz, et al.: ASME 73-ICT-89 (1973)
- (15) J. G. Truxal: Control System Synthesis (1955)
- (16) 電氣学会：電氣鉄道ハンドブック p. 73 (昭 37)
- (17) J. C. Houbolt: Proceedings of the American Society Civil Engineer, Journal of Air Transportation Division, 89, AT-1 (1961-3)
- (18) 山村, 他：昭 50 電氣学会全国大会 No. 869
- (19) 山村・阿部：昭 50 電氣学会全国大会 No. 868
- (20) 山村：昭 50 電氣学会全国大会 No. 867

- (21) 近藤・西原・岩井：電子制御工学 p. 237 (昭 38)
- (22) 高島：東京大学電氣工学科卒業論文 (昭 50-3)
- (23) 山村・阿部・岩滝：システム制御研究会資料 SC-75-1 (昭 50-10)
- (24) 山村・伊藤：電氣学会論文誌 95-B, 209 (昭 50-4)

付 録

(1) 軌道精度の表わし方⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ 鉄道レールの

軌道精度(高低)は、長さ $l=10\text{m}$ の糸を張った時の中央部の誤差 d で表わすことが多い。 d は正規分布をなすので、その 3σ 値 c で軌道精度を代表させれば、 A は次のようにして c で表わすことができる。

Z の自己相関関数のフーリエ変換により軌道凹凸の PSD $\Phi_z(\Omega)$ は、

$$\overline{Z(u)Z(u+l)} = \int_0^\infty \Phi_z(\Omega) \cos \Omega l d\Omega \quad \dots\dots\dots (付 1)$$

で表わすことができる。(12)式より $\Phi_z(\Omega) = A/\Omega^2$ であるから、(付 2)式が得られる。

$$\sigma_d^2 = \left\{ \frac{Z(u+l/2) + Z(u-l/2)}{2} - Z(u) \right\}^2 = \frac{\pi l A}{4} \left(\because \int_0^\infty \frac{\sin^2 x}{x^2} dx = \frac{\pi}{2} \right) \dots\dots (付 2)$$

$$\therefore A = \frac{4C^2}{9\pi l} \dots\dots\dots (付 3)$$

日本の第 1 級の鉄道線路では $d=7\text{mm}$ が保守基準として用いられている。保守のゆきとどいた新幹線並の軌道では $C=7\text{mm}$ 程度の軌道精度が得られていると考えると、 $A=0.7 \times 10^{-6}\text{m}$ となり、文献の溶接レールの値^{(12)~(14)}に近い結果が得られる。

また、吸引形磁気浮上では軌道に働く力が分布荷重となるため、従来の鉄道のような道床がいらない。したがって、容易に高い軌道精度が得られ、 A の値は上よりもさらに小さくなるだろう。

付第 1 図 軌道精度の表わし方

app. Fig. 1. Expression of guideway roughness.