

# 磁気浮上による超高速列車の浮上特性

## Suspension Characteristics of Magnetically Suspended High Speed Trains

高橋孝夫\* 奥山賢一\*\*  
Takao Takahashi Kenichi Okuyama

### 要 旨

磁気浮上による超高速列車の浮上力計算式を導出し、一般的特性を考察するとともに、具体例について計算を行なった。また磁気ガイド方式についても計算検討を行なった。

### 1. 緒 言

磁気浮上方式による超高速列車の構想については、たとえば Powell, Danby などにより提案されており<sup>(1)</sup>、特性計算式についても一部明らかにされているが、特性をより正確な形で計算し、一般的な特性を系統だてて把握(はあく)する目的で磁気浮上列車の浮上特性計算式を明らかにした。

計算式の導出にあたっては、後述する仮定ならびに条件が付加されているから、どんな場合にも適用しうるものではないが、得られた特性計算式は簡単な形であり、多くの示唆に豊み、一般的な傾向を予知するにはじゅうぶん役だつと思う。

### 2. 計算する上での仮定

- (1) 解析解を容易に得るために、コイルが体積を有していることならびに有限長であることを無視して、車上ならびに地上コイルを線状ループと考え、コイル間の磁束の結合、発生電磁力を計算するときには、無限長線状電流の場合の式を用いた。
- (2) 相隣合った地上コイル相互間の影響を無視する。したがって電磁力には脈動はなく、平均値が得られる。
- (3) 定常状態を考え、端効果はないものとする。
- (4) 浮上力を含めた電磁力は、車上コイルの代わりに相対的に地上コイルを移動したとき、地上コイル中央が車上コイルの先端を通り過ぎてから同じ車上コイルの終端を通り過ぎるまでに、地上コイルに誘起されて流れる電流の平均値を求め、これと車上コイル電流との間に働く電磁力として計算する。

### 3. 記号の説明

- $l_{sc}$ : 車上コイル長 (m)
- $l_{nc}$ : 地上コイル長 (m)
- $a$ : 地上コイル幅 (m)
- $b$ : 車上コイル幅 (m)
- $h$ : 浮上高さ (m)
- $v$ : 列車速度 (m/s)
- $R$ : 地上コイルの抵抗 ( $\Omega$ )
- $L$ : 地上コイルのインダクタンス (H)
- $m$ : 車上コイルの巻数
- $n$ : 地上コイルの巻数
- $i_s$ : 車上コイル電流 (A)
- $\mu_0$ : 真空の透磁率 (H/m)
- $\omega$ :  $\omega = \frac{\pi v}{l_{sc}}$  (rad/s)

\* 日立製作所日立研究所  
\*\* 日立製作所日立研究所 工学博士

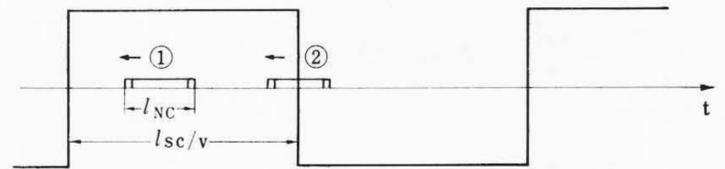


図1 車上コイルによる磁界

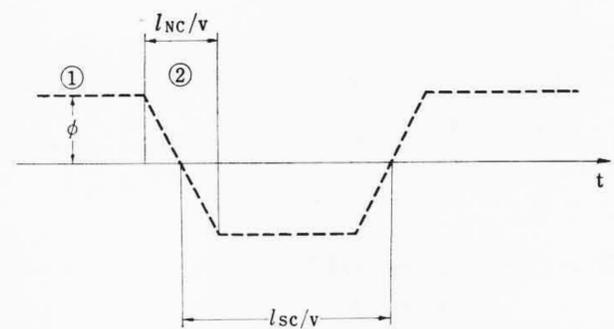


図2 地上コイルの鎖交磁束数

- $t_1$ :  $t_1 = (l_{sc} - l_{nc}) / 2v$  (s)
- $N$ : 1車両の下にある地上コイルの数
- $F_z$ : 浮上力 (kg/m)
- $F_x$ : 水平方向変位力または水平方向復元力 (kg/m)
- $F_D$ : 制動力 (kg/1車両)
- $k_d$ : 浮上力と制動力の比

### 4. 浮上特性計算式の導出

#### 4.1 一般式

車上には極性が交互に変わるようにコイルを配置してあるから、車上コイルの代わりに相対的に地上コイルを速度  $v$  で動かして考えると、地上コイルの一点における車上コイルによる磁界の強さは、時間的に図1に示すように変化する。車上コイルと地上コイルの配置ならびに構成法により大きさは異なるが時間的変化のパターンは同じである。図1の①の位置では地上コイルと鎖交する磁束は変化しないが②の位置では、車上コイルによる磁界の方向が反転しているから、鎖交磁束数に変化が起こる。すなわち、地上コイルの鎖交磁束数は時間的に図2に示すように変化する。

図2の①の位置で、地上コイル単位長あたりの鎖交磁束数  $\phi$  は  $\phi = M i_s$  .....(1) となる。ここで、 $M$  は地上と車上コイル間の単位長あたりの相互インダクタンス、 $i_s$  は車上コイル電流である。

地上コイルの移動時間  $l_{nc}/v$  の間に地上コイルの鎖交磁束量は  $\phi l_{nc}$  から  $-\phi l_{nc}$  に変化し、図3に示す電圧が誘起される。その大きさ  $A$  は

$$A = -\frac{-\phi l_{nc} - \phi l_{nc}}{l_{nc}/v} = 2\phi v = 2M i_s v \dots\dots\dots(2)$$

となる。図3の誘起電圧波形を図4に示すように時間軸を定めて、フーリエ展開すると、地上コイル誘起電圧  $e_N(t)$  は

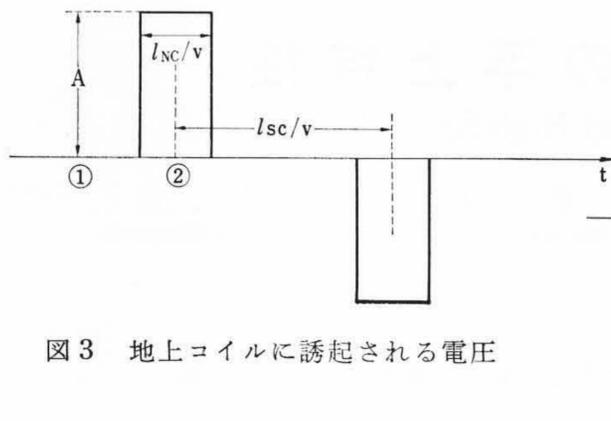


図3 地上コイルに誘起される電圧

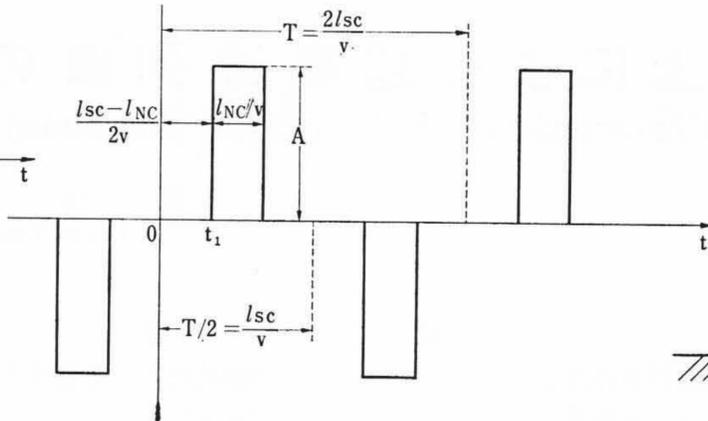


図4 地上コイル誘起電圧波形のフーリエ展開

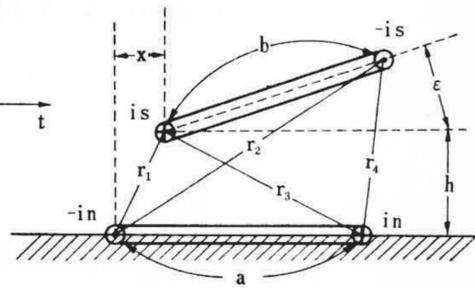


図5 車上コイルと地上コイルの構成図

$$e_N(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos(2k-1)\omega t_1 \sin(2k-1)\omega t \quad \dots (3)$$

となる。ここで

$$t_1 = (l_{sc} - l_{NC})/2v \quad \dots (4)$$

$$\omega = \frac{\pi v}{l_{sc}} \quad \dots (5)$$

ここに、 $b_k = \text{定数}$

ゆえに、L-R回路から成る地上コイルに流れる電流  $i_N(t)$  は

$$i_N(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k}{Z_k} \cos(2k-1)\omega t_1 \sin\{2k-1\}\omega t - \varphi_k \quad \dots (6)$$

となる。ここで

$$Z_k = \sqrt{R^2 + \{(2k-1)\omega L\}^2} \quad \dots (7)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \frac{(2k-1)\omega L}{R} \quad \dots (8)$$

列車の進行方向を  $y$  軸、横方向を  $x$  軸、上下方向を  $z$  軸と定めると、車上コイルと地上コイルの間に働く単位長あたりの電磁力は次式で与えられる。

$$\text{浮上力 } f_z(t) = -\frac{i_S i_N(t)}{9.8} \frac{\partial M}{\partial z} \quad (\text{kg/m}) \quad \dots (9)$$

$$\text{水平方向電磁力 } f_x(t) = -\frac{i_S i_N(t)}{9.8} \frac{\partial M}{\partial x} \quad (\text{kg/m}) \quad \dots (10)$$

浮上力の平均値を  $F_z$  とすると

$$F_z = \frac{1}{T/2} \int_{t_1 + l_{NC}/2v}^{t_1 + l_{NC}/2v + T/2} f_z(t) dt = \left(-\frac{8A i_S}{9.8\pi^2}\right) \frac{\partial M}{\partial z} f_f \quad (\text{kg/m}) \quad \dots (11)$$

$$\text{ただし } f_f = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_k}{Z_k} \sin \varphi_k \quad \dots (12)$$

ここで、 $B_k$  は定数。

同様に水平方向電磁力  $F_x$  は

$$F_x = \left(-\frac{8A i_S}{9.8\pi^2}\right) \frac{\partial M}{\partial x} f_f \quad (\text{kg/m}) \quad \dots (13)$$

となる。

地上コイル電流の実効値  $I_n$  は

$$I_n = \sqrt{2/T} \int_{t_1 + l_{NC}/2v}^{t_1 + l_{NC}/2v + T/2} \{i_N(t)\}^2 dt = (1/\sqrt{2})(4A/\pi)\sqrt{f_r} \quad \dots (14)$$

したがって、地上コイルに生ずる  $I^2 R$  損失  $W$  は

$$W = I_n^2 R = \frac{R}{2} \left(\frac{4A}{\pi}\right)^2 f_r \quad \dots (15)$$

となる。

$$\text{ただし } f_r = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C_k}{Z_k^2} \quad \dots (16)$$

ここに、 $C_k$  は定数

1車両の下にある地上コイルの数を  $N$  とすると、1車両あたりの制動力  $F_D$  は

$$F_D = \frac{N}{9.8v} \frac{R}{2} \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 A^2 f_r \quad \dots (17)$$

となる。

浮上力、変位力、制動力は地上コイルと車上コイル間の相互インダクタンス  $M$  がわかれば、それぞれ (11), (13), (17) 式から計算できる。

#### 4.2 各コイル構成での特性計算式

##### 4.2.1 浮上力と水平方向変位力

図5に示すような、地上コイルと車上コイルの構成を考える。この場合、車上と地上コイル間の単位長あたりの相互インダクタンス  $M$  は

$$M = (nm) \frac{\mu_0}{2\pi} \log \frac{r_1 r_4}{r_2 r_3} \quad \dots (18)$$

となる。

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \sqrt{x^2 + h^2} \\ r_2 &= \sqrt{(x + b \cos \epsilon)^2 + (h + b \sin \epsilon)^2} \\ r_3 &= \sqrt{h^2 + (a - x)^2} \\ r_4 &= \sqrt{(x + b \cos \epsilon - a)^2 + (h + b \sin \epsilon)^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots (19)$$

したがって、(2), (11), (13), (17) 式より

$$\begin{aligned} \text{浮上力 } F_z &= \left(\frac{2\mu_0 n m i_S}{\pi^2}\right)^2 \frac{v}{9.8} \left(\log \frac{r_2 r_3}{r_1 r_4}\right) \\ &\times \left(\frac{h}{r_1^2} - \frac{h + b \sin \epsilon}{r_2^2} - \frac{h}{r_3^2} + \frac{h + b \sin \epsilon}{r_4^2}\right) f_f \\ &(\text{kg/m}) \quad \dots (20) \end{aligned}$$

水平方向変位力

$$\begin{aligned} F_x &= \left(\frac{2\mu_0 n m i_S}{\pi^2}\right)^2 \frac{v}{9.8} \left(\log \frac{r_2 r_3}{r_1 r_4}\right) \\ &\times \left(\frac{x}{r_1^2} - \frac{x + b \cos \epsilon}{r_2^2} + \frac{a - x}{r_3^2} + \frac{x + b \cos \epsilon - a}{r_4^2}\right) f_f \\ &(\text{kg/m}) \quad \dots (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{制動力 } F_D &= \frac{N}{9.8v} \frac{R}{2} \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \left(nm \frac{\mu_0}{\pi} i_S v \log \frac{r_2 r_3}{r_1 r_4}\right)^2 f_r \\ &(\text{kg/1車両}) \quad \dots (22) \end{aligned}$$

となる。

##### 4.2.2 復元力

図6に示すコイル構成で、水平方向に復元力を発生し水平方向のガイドをさせようとする構想が知られている<sup>(2)</sup>。このとき、単位長あたりの相互インダクタンスは

$$M_1 = \frac{\mu_0}{\pi} (nm) \log \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + a^2}} \quad \dots (23)$$

$$M_2 = \frac{\mu_0}{\pi} (nm) \log \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + a^2}} \quad \dots (24)$$

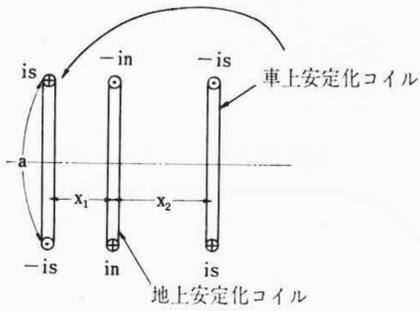


図6 水平方向ガイド方式

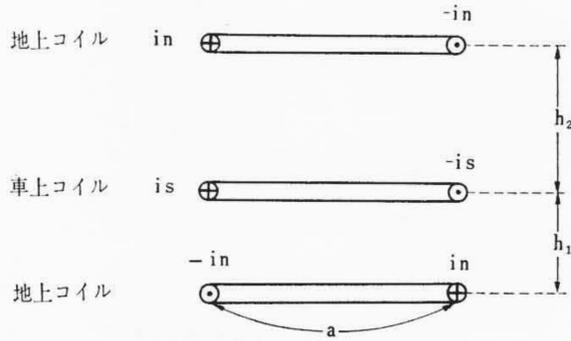


図7 Null Flux 法

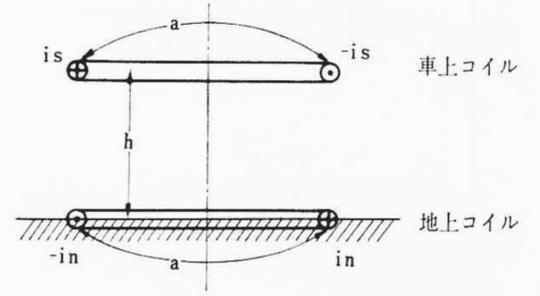


図8 水平方向変位がない場合の浮上

となる。左右の車上コイル電流の向きが反対であることを考慮して、(2)式より

$$A = 2(M_1 - M_2)isv = \frac{2\mu_0 isv}{\pi} (nm) \log \frac{x_1 \sqrt{x_2^2 + a^2}}{x_2 \sqrt{x_1^2 + a^2}} \dots (25)$$

復元力  $F_x$  は(13)式より

$$F_x = \left( -\frac{8Ais}{9.8\pi^2} \right) \left( \frac{\partial M_1}{\partial x_1} + \frac{\partial M_2}{\partial x_2} \right) f_f$$

$$= \left( \frac{4a\mu_0 nm is}{\pi^2} \right)^2 \frac{v}{9.8} \left\{ \log \left( \frac{x_2 \sqrt{x_1^2 + a^2}}{x_1 \sqrt{x_2^2 + a^2}} \right) \right\}$$

$$\times \left\{ \frac{1}{x_1(x_1^2 + a^2)} + \frac{1}{x_2(x_2^2 + a^2)} \right\} f_f \dots (26)$$

また制動力  $F_D$  は(17)式より

$$F_D = \frac{N}{9.8v} \frac{R}{2} \left( \frac{4}{\pi} \right)^2 \left\{ \frac{2\mu_0 is nm v}{\pi} \log \left( \frac{x_1 \sqrt{x_2^2 + a^2}}{x_2 \sqrt{x_1^2 + a^2}} \right) \right\}^2 f_r$$

..... (27)

となる。

図7に示すように、車上コイルの上下に互に直列に接続した一対の地上コイルを置き流れる電流の向きが反対になるようにして、浮上力を得る Null flux 法の特性計算式も、上式において  $x_1 \rightarrow h_1, x_2 \rightarrow h_2$  と置き換えることにより得られる。

### 5. 特性計算

#### 5.1 水平方向に変位がない場合

##### 5.1.1 計算式

図8に示すように、車上コイルが地上コイルに対して、水平方向に変位してないときの特性は(20), (21), (22)式において  $x=0, \epsilon=0, b=a$  と置くことにより

浮上力は

$$F_z = \left( \frac{2\mu_0 nm is}{\pi^2} \right)^2 \frac{2v}{9.8h} \left\{ 1 - \frac{1}{1+(a/h)^2} \right\} \log \{1+(a/h)^2\} \cdot f_r$$

(kg/m) ..... (28)

水平方向変位力は  $F_x=0$

制動力は

$$F_D = \frac{RN}{9.8} \left( \frac{2\mu_0 nm is}{\pi^2} \right)^2 v [\log \{1+(a/h)^2\}]^2 f_r$$

(kg/1車両) ..... (29)

となる。また、浮上力と制動力の比を  $k_d$  とすると

$$k_d = \frac{l_{Nc} \left\{ 1 - \frac{1}{1+(a/h)^2} \right\}}{hR [\log \{1+(a/h)^2\}]} f_r$$

##### 5.1.2 一般特性の検討

(28), (29)式から明らかなように、浮上力、制動力とも車上コイルの  $AT(mis)$  の自乗に比例して増加し、浮上高さ  $h$  が小さくなると大きくなる。

次に、速度依存性を調べる。このためには級数和である  $f_r, f_r$  をみればよいが、第1項のみをとっても誤差は数パーセント以下

であり、一般的傾向を把握するにはじゅうぶんである

このとき浮上力は

$$F_z = k_1 v n^2 \frac{\cos \omega t_1 \sin \varphi}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \dots (30)$$

ここで、

$$k_1 = \left( \frac{2\mu_0 mis}{\pi^2} \right)^2 \frac{2}{9.8h} \left\{ 1 - \frac{1}{1+(a/h)^2} \right\} \log \{1+(a/h)^2\}$$

..... (31)

制動力は

$$F_D = k_2 v n^2 \frac{\cos^2 \omega t_1}{R^2 + (\omega L)^2} \dots (32)$$

ここで、

$$k_2 = \frac{RN}{9.8} \left( \frac{2\mu_0 mis}{\pi^2} \right)^2 [\log \{1+(a/h)^2\}]^2 \dots (33)$$

となる。 $\omega = \pi v / l_{sc}$  であるから高速域では

$$R \ll \omega L \dots (34)$$

が成立し、

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \doteq \frac{\pi}{2} \text{ したがって } \sin \varphi = 1$$

となるから(30), (32)式より高速域の特性計算式として

$$\text{浮上力 } F_z = k_1 \frac{n^2 l_{sc} \sin \left( \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{sc}} \right)}{\pi L} \dots (35)$$

$$\text{制動力 } F_D = k_2 \frac{n^2 l_{sc}^2 \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{sc}} \right)}{v \pi^2 L^2} \dots (36)$$

となる。

すなわち、(34)式が満たされる場合、一例として高速域では浮上力は速度  $v$  に関係せず(35)式で表わされる一定値  $F_{z\infty}$  となる。

$F_{z\infty}$  の90%の浮上力が得られる速度  $v_{90}$  を求めてみる。 $\sin \varphi \doteq 1$  とおいてもよいから

$$k_1 v_{90} \frac{n^2 \sin \left( \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{sc}} \right)}{\sqrt{R^2 + \left( \frac{\pi v_{90}}{l_{sc}} L \right)^2}} = 0.9 F_{z\infty} \dots (37)$$

$$\text{すなわち } v_{90} = 2.06 \frac{l_{sc} R}{\pi L} \text{ (m/s)} \dots (38)$$

となる。

また、制動力は(36)式から高速域では  $v^{-1}$  に比例すると言える。

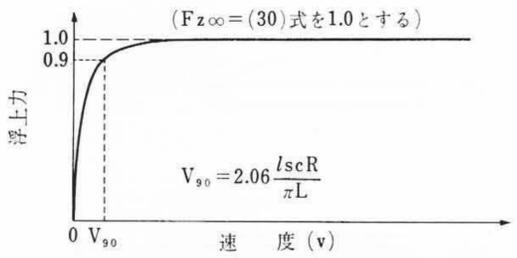
(32)式において  $\frac{\partial F_D}{\partial v} = 0$  から  $F_D$  が最大値をとる速度  $v_{F_{Dmax}}$  を求めると

$$v_{F_{Dmax}} = \frac{l_{sc} R}{\pi L} \dots (39)$$

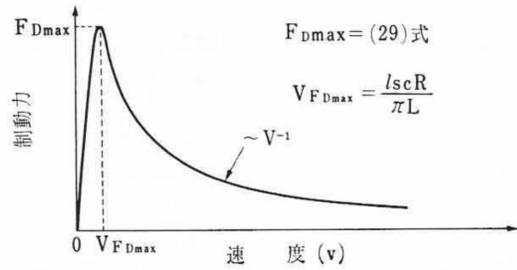
となる。このとき最大の制動力  $F_{Dmax}$  は

$$F_{Dmax} = \frac{N}{9.8} \left( \frac{4\mu_0 nm is}{\pi^2} \right)^2 \frac{1}{\pi L} [\log \{1+(a/h)^2\}]^2$$

$$\times l_{sc} \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{sc}} \right) \dots (40)$$



(a) 浮上力の速度依存性



(b) 制動力の速度依存性

図9 特性の速度依存性

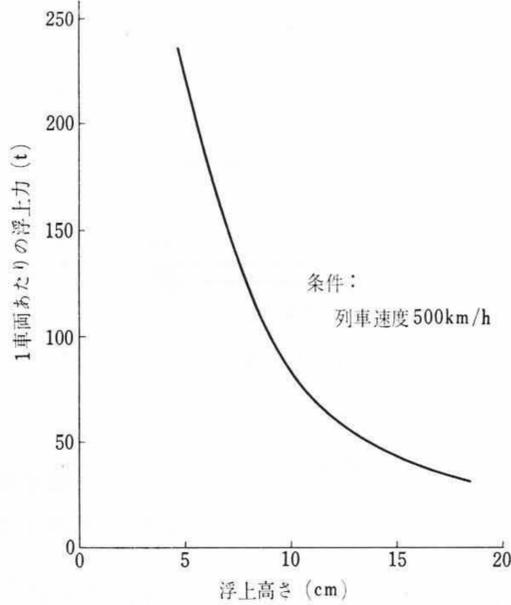


図10 浮上高さ と 浮上力

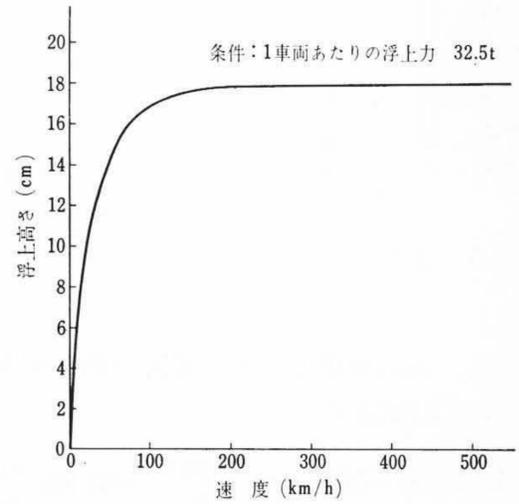


図11 列車速度 と 浮上高さ

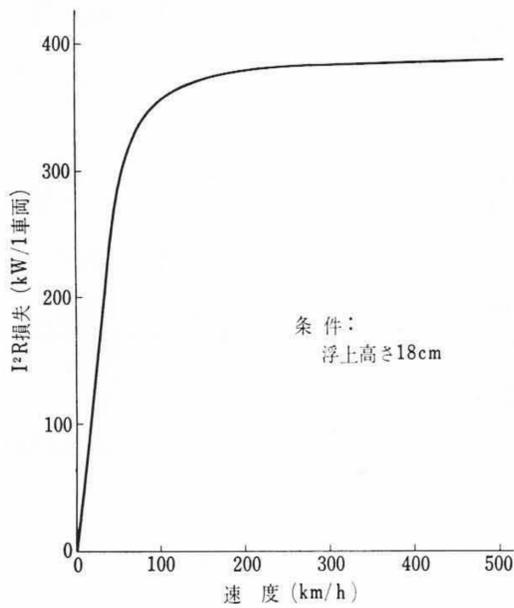


図12 列車速度 と I<sup>2</sup>R 損失

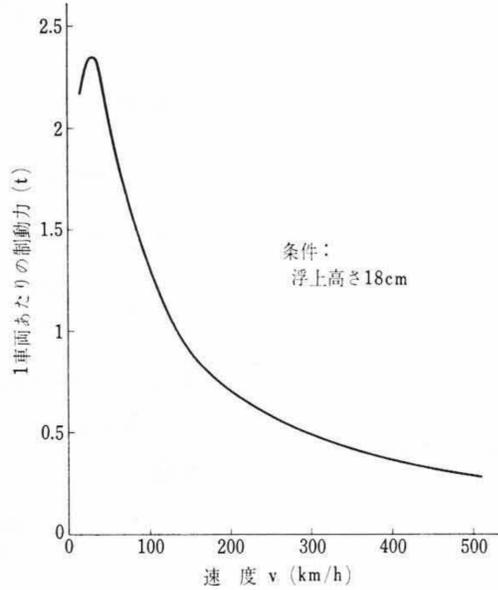


図13 列車速度 と 制動力

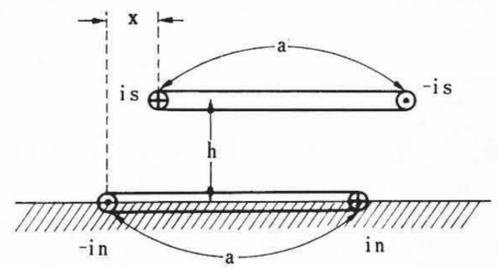


図14 水平方向に変位がある場合の浮上

となり、 $R$  には関係しないことがわかる。

以上の検討結果をまとめると図9(a),(b)となる。

引き続き、(34)式が満たされるたとえば高速域において、地上コイルの巻数ならびに地上コイルの長さ と 浮上力 と の 関 係 を 調 べ て みる。

地上コイルのインダクタンス  $L$  はコイル単独のインダクタンスと外部に接続したリアクトルのインダクタンスの和であるから、前者は地上コイル長  $l_{Nc}$  と巻数  $n$  の自乗に比例すると考えれば  $k_3 n^2 l_{Nc}$  ( $k_3$  はコイル形状により定まる定数)、後者を  $L_e$  とすると

$$L = k_3 n^2 l_{Nc} + L_e \dots\dots\dots (41)$$

となる。もし、外部リアクトルを接続しない場合かまたは  $L_e \ll k_3 n^2 l_{Nc}$  のときは

$$L \doteq k_3 n^2 l_{Nc}$$

となる。この値を(35)式に代入すると

$$F_z = k_1 \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{Sc}}\right)}{\pi k_3} (l_{Sc}/l_{Nc}) \dots\dots\dots (42)$$

となる。(42)式から浮上力は地上コイルの巻数  $n$  に関係しないことならびに  $l_{Nc}/l_{Sc} > 2$  のとき、すなわち地上コイルが車上コイルよりも2倍以上大きいと、 $\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{Sc}}\right) < 0$  なる場合があり、このとき地上コイルと車上コイルとの間に吸引力が働くことになる。

次に地上コイル長  $l_{Nc}$  と車上コイル長  $l_{Sc}$  の比  $l_{Nc}/l_{Sc}$  による特性を調べてみる。

$l_{Nc}/l_{Sc} = 1$  のとき

表1 磁気浮上列車の諸元例

(浮上, 安定特性計算条件)

部 位	項 目	諸 元
車上コイル	1 個あたりの寸法	長さ 6 m × 幅 0.8 m
	1 車両あたりの個数	8 (両側に4個)
	起 磁 力	320 kAT
地上コイル	1 個あたりの寸法	長さ 2 m × 幅 0.8 m
	1 車両の下にある個	24 (両側に12個)
	巻 数	100 T
	1 個あたりのインダクタンス	0.33 H (0.26 H 外部)
	1 個あたりの抵抗	1.56 Ω

$$(l_{Sc}/l_{Nc}) \sin \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{Sc}} = 1 \times \sin \frac{\pi}{2} = 1$$

$l_{Nc}/l_{Sc} = 1/2$  のとき

$$(l_{Sc}/l_{Nc}) \sin \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{Sc}} = 2 \times \sin \frac{\pi}{4} = \sqrt{2}$$

$l_{Nc}/l_{Sc} = 1/3$  のとき

$$(l_{Sc}/l_{Nc}) \sin \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{Sc}} = 3 \times \sin \frac{\pi}{6} = 1.5$$

$l_{Nc}/l_{Sc} = 1/4$  のとき

$$(l_{Sc}/l_{Nc}) \sin \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{Sc}} = 4 \times \sin \frac{\pi}{8} = 1.532$$

$l_{Nc}/l_{Sc} \ll 1$  のとき

$$(l_{Sc}/l_{Nc}) \sin \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{Sc}} \doteq (l_{Sc}/l_{Nc}) \frac{\pi}{2} \frac{l_{Nc}}{l_{Sc}} = \frac{\pi}{2}$$

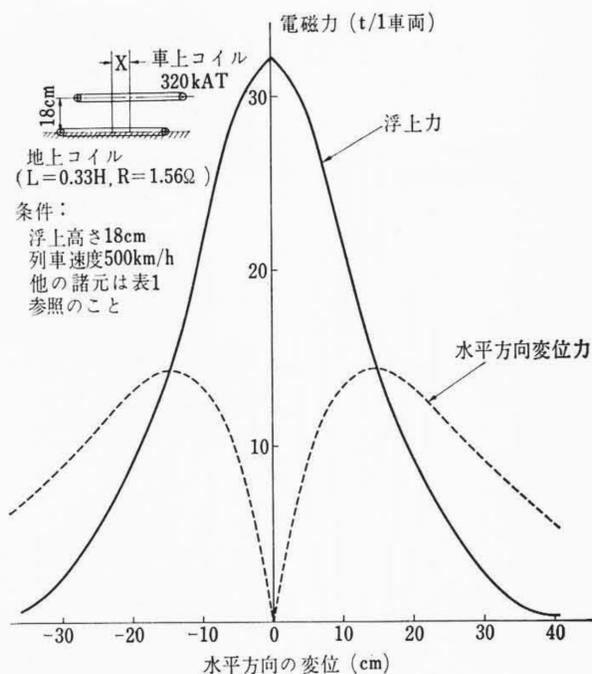
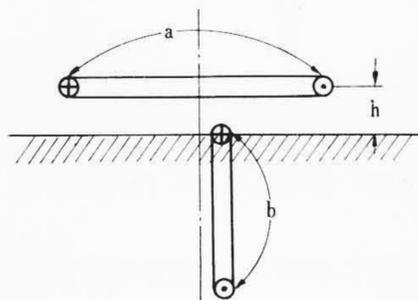
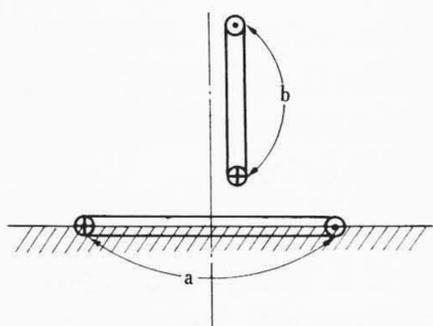


図 15 水平方向に変位がある場合の浮上



(A)



(B)

図 16 安定化コイル (I)

すなわち、地上コイル側のインダクタンスとして、地上コイル単独のインダクタンスのみを考え、しかもこのインダクタンスが地上コイル長に比例すると仮定すると、 $l_{Nc}/l_{Sc}$  を小さくすると、浮上力の平均値は若干増加するがすぐ飽和して

$$F_z = \frac{k_1}{2k_3}$$

となる。

他方、地上コイルの外部に接続したインダクタンスが大きいときには、浮上力に地上コイルの巻数が影響してくる。

5.1.3 計算例

表 1 に示した具体的な数値を用いて特性計算をしてみる。

図 10 は浮上高さとして 1 車両に働く浮上力の関係を示したものである。浮上高さが小さいとき極めて大きな浮上力となる。

図 11 は 1 車両あたりに働く浮上力を 32.5(t) として、列車速度と浮上高さの関係を示したものである。時速 150 km 以上で浮上高さはほぼ一定で 18 cm となる。

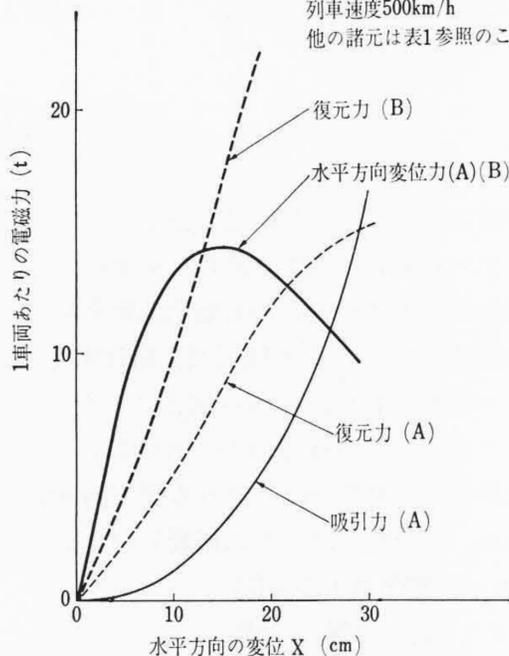
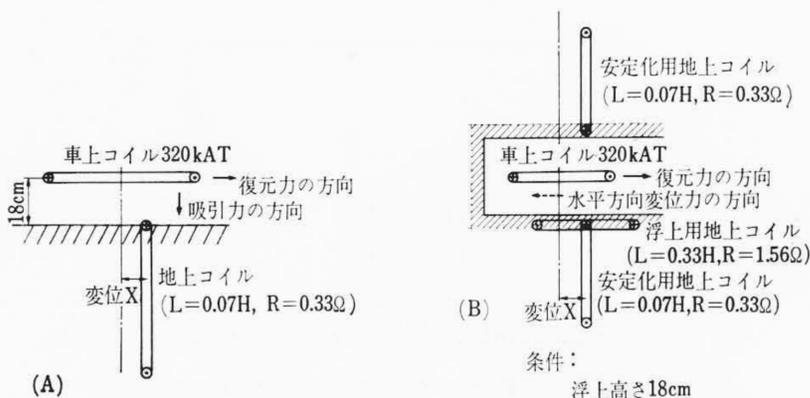


図 17 安定化コイル (I) の特性

図 12, 13 はそれぞれ列車速度に対する地上コイル中の  $I^2R$  損失ならびに制動力を示したものである。

地上コイル中の  $I^2R$  損失が速度に対して飽和特性を示すのは速度が大きくなり  $R \ll \omega L$  の条件が満たされると (35) 式のように浮上力が速度に無関係となることから明らかのように、地上コイル中に流れる電流が速度に無関係となる結果である。

地上コイル中の  $I^2R$  損失が速度の上昇につれて一定値となる結果  $I^2R$  損失に起因する制動力は速度に逆比例して小さくなる。

500 km/h における 浮上力/制動力 の計算値は

$$F_D/F_D = 32.5(t)/0.28(t) = 116$$

である。

5.2 水平方向の変位がある場合

5.2.1 計算式

車上コイルと地上コイルが図 14 に示すように水平方向に  $x$ (m) 変位しているときの特性計算式は (20), (21), (22) 式において  $x = x, b = a, \epsilon = 0$  と置くことにより得られる。

5.2.2 計算例

図 15 は表 1 に示した諸元を用いて、車上コイルが平衡位置から変位した場合の発生電磁力を計算した結果である。

水平方向の変位があると浮上力は減少するが、水平方向変位力は大きくなり、計算例では  $x = 14$  cm で最大となる。水平方向の変位力は、車上コイルの変位を増大させる方向に働くから安定化コイルにより復元力を与える必要がある。

5.3 安定化コイル (I)

5.3.1 計算式

図 16(A) に示す安定化コイルの特性は同図 (B) と等価となり (20), (21), (22) 式において  $\epsilon = 90^\circ$  を代入することにより得られる。

5.3.2 計算例

図 17 は表 1 に示す諸元を用いて、図 16(A) に示した安定コイ

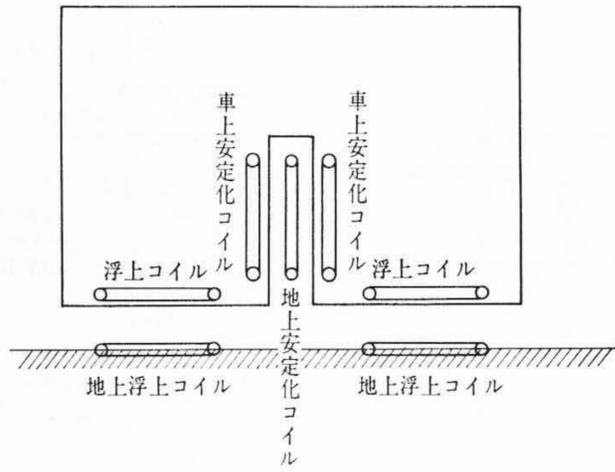


図18 安定化コイル(II)

ルの特性を計算した結果である。ただし、地上コイルのインダクタンス  $0.07H$  (外部リアクトルなし) 抵抗  $0.33\Omega$  とした。復元力はあるが小さく。しかも地上、車上コイル間に吸引力が働き浮上の妨げとなる。この吸引力を相殺する目的で図17(A)の車上コイルの上にもうひとつの地上コイルを置く提案(図17(B))もされている。しかし図17に示すように、復元力は倍増するが、変位が小さい範囲ではやはり水平方向変位力のほうが大きくなっており、この間では左右に振動しやすいことになる。

5.4 安定化コイル(II)

5.4.1 計算式

図18に示す安定化コイルの特性は(26),(27)式より計算することができる。

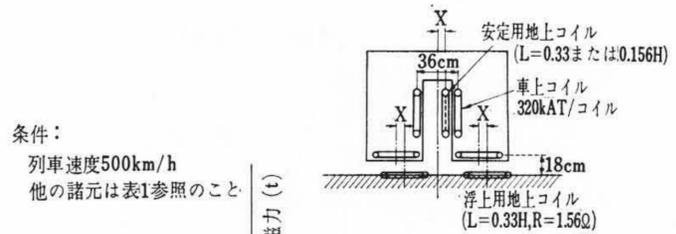
5.4.2 計算例

図19は表1に示した諸元により、図18に示した安定化コイルの復元力を計算した結果である。水平方向の変位がない平衡位置では地上の安定化コイルに対して、車上にある左右の安定化コイルの磁束は互いに打ち消し合い、地上の安定化コイルには電流は誘起されないが水平方向に変位すると地上安定化コイルに電流が誘起され復元力が発生する。この復元力は地上安定化コイル回路のインダクタンスを小さくすると大きくなり、図19において点線で示した水平方向変位力よりも大きな復元力が得られ、有効な安定化コイルとなる。

6. 結 言

以上をまとめると次のようになる。

- (1) 磁気浮上方式超高速列車の浮上特性計算式を明らかにした。



条件:  
列車速度500km/h  
他の諸元は表1参照のこと

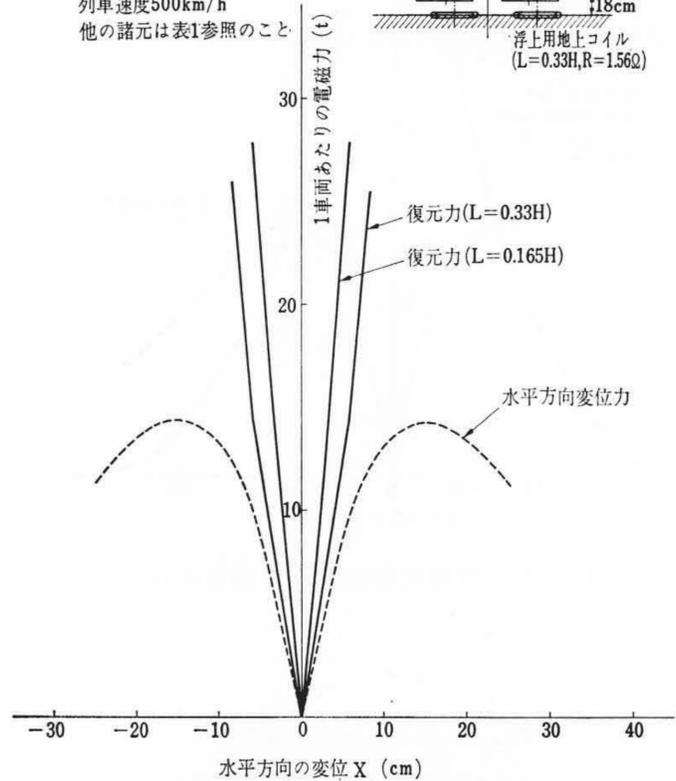


図19 安定化コイル(II)の特性

- (2) 浮上力ならびに制動力の速度依存性を明確にした。
- (3) 地上コイルの巻数ならびに地上コイル長と浮上力の関係を明らかにした。
- (4) 具体的な数値を用いて特性計算を行ない、これにより車上コイルが水平方向にずれた場合の水平方向変位力ならびに安定化コイルによる復元力を示した。

終わりに本研究にあたりご指導、ご鞭達(べんたつ)を賜った日本国有鉄道京谷計画主幹はじめ諸関係者、日立製作所日立工場西副工場長、日立研究所小林所長および磁気浮上超高速列車研究グループに深甚の謝意を表するものである。

参 考 文 献

- (1) J. R. Powell, C. R. Danby: High Speed Transport by Magnetically Suspended Trains, ASME Publication 66-WA/RR5
- (2) J. R. Powell, C. R. Danby: The Application of Superconductors to High Speed Transport, Cryogenics and Industrial Gases, Oct., 1969