UDC 621.313.323: 621.333

論 文

51-B 47

同期形推進浮上兼用リニアモータの推進 浮上特性と適用領域

鉄道技術研究所

西 條 隆 繁

1. ま え が き

地方鉄道から新幹線鉄道まで、現在の鉄道の特徴は車輪とレールを有することであり、車輪は車体の支持と駆動の二つの目的をもって使用されている。

近年、騒音公害の防止や時速 300 km 以上の高速列車の実現を目指して、車輪を使用しない鉄道、すなわち浮上式鉄道の開発研究が各国ですすめられている。この場合、一般に、車両の駆動方法としてはリニアモータが、車体の支持方法としては空気浮上方式や磁気浮上方式が研究の対象となっている⁽¹⁾⁽²⁾。

リニアモータの代表例としては、誘導形リニアモータと同期形リニアモータがあるが、これとは別にリニアモータの機能面に着目してみると、通常の推進専用のものの他に推進浮上兼用という形式が考えられる。事実、推進浮上兼用リニアモータについての具体的提案が、すでにいくつかなされてきている^{(3)~(5)}。

しかし、推進浮上兼用リニアモータの構成と特性についての体系的な解析結果が、従来あまり発表されていないため、推進専用形と推進浮上兼用形相互間の技術的関連や浮上式鉄道への適用の可能性についての客観的な評価ができないという難点があった。

このような事情にかんがみ、本論文はたて形の地上電機子コイルを用いる形式の同期形リニアモータについて、筆者が提案する推進浮上兼用リニアモータを構成する場合の考え方、および解析モデルを提案し、推進力および浮上力特性を明らかにするとともに、推進専用形および推進浮上兼用形の技術的位置づけと、推進浮上兼用リニアモータ適用領域に関する検討結果について紹介する。

2. 解析モデルの提案

同期形リニアモータの典型的な一例を第1図に示す。これは一般にリニアシンクロナスモータと呼ばれているもので、車上に界磁があり、地上にたて形の電機子コイルが置かれている。ここに述べる推進浮上兼用リニアモータは、この構成において、

第1図 同期形リニアモータの構成

Fig. 1. Construction of conventional linear synchronous motor.

第2図 同期形推進浮上兼用リニアモータの
解析モデル

Fig. 2. Analytic model of linear synchronous motor for both propulsion and suspension.

Thrust and Suspension Force of Linear Synchronous Motors for Both Propulsion and Suspension. By Takashige Saijo Member (Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways)

西條隆繁：正員，鉄道技術研究所電力機械研究室

第3図 車上界磁と地上電機子コイルの断面図

Fig. 3. Sectional diagram of armature coil on earth and magnetic field on vehicle.

第4図 地上電機子コイルの通電電流

Fig. 4. Current wave forms of armature coil on earth.

- ① 車上界磁と地上コイルの相対位置を上下方向に幾分変える。
- ② 磁束分布および地上コイル電流に直流分を重畳させる。

ことにより、車上界磁に浮上力を与えようとするものであり、文献(3)～(5)などに述べられている推進浮上兼用リニアモータは、後述する解析モデルに特定の定数を与えた一応例とみることができる。

このような構成例をもとにした一般的な解析モデルとして、第2図～第4図を提案する。地上コイルは第2図に示すように対称多相(m 相)構成であり、これらのコイルが地上に連続して固定され、かつ、各相ごとに個数直列に接続され、1き電区間ごとに電源に結ばれる。電源は e_1 から e_m までの対称多相交流電源を基本とし、これに直流分 e_0 が重畳される。したがって、地上コイル各相に流れる電流は第4図に示すように、直流分と交流分が重畳した波形となる*。

*: このような特性をもった電源は、一般にはサイクロコンバータやインバータ等のサイリスタ電力変換器により構成できる。具体的な変換器形式は、車上界磁の種類、地上コイル電流波形、列車運転速度などを考慮し、有利な方式を採用することになる。

地上コイルは、第2図においては説明のつごう上、第1相から第 m 相までずらして書いてあるが、実際には第3図に示すように、全相重ね合わせて一体とし、車上界磁のギャップ中に置れる。なお、第3図の車上界磁は鉄心入り常電導界磁のような図面になっているが、これは超電導界磁であっても、以下に述べる解析は本質的には変わらない。

3. 推進力および浮上力の解析

前節に述べた解析モデルをもとに地上コイル1相分の図面を画いてみると、第5図のようになる。車上界磁のポールピッチを τ とすると、同一相の地上コイルの配置間隔は 2τ である。1つのコイルの長さを l とすると、 $l = \tau$ のときが全節巻となる。しかし、リニアモータにおいては、せまい界磁ギャップを有効に利用するために、一般に第5図に示すように、第 i 相のコイル $C_{i1}, C_{i2}, \dots$ の間に、電気角度でちょうど 180 度の位相関係にあるコイル $C_{i1}, C_{i2}, \dots$ をはめこむように設計する。そのため、全節巻といっても完全な全節巻は存在せず、 $l = \tau$ であり、厳密な意味では必ず短節巻となる。

このような巻方を、本論文では l が電気角度の 180 度を目標にしているという意味で 180 度巻と呼ぶことにする。同様な意味で 90 度巻、 120 度巻……など任意に存在するが、以下に述べる解析法はそのいずれにも適用できるように考えている。

いま、 x, y 座標系を第5図に示すようにとったとき、地上コイル部分における磁束分布が、

$$b = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (B_{1n} \sin n \omega_b x + B_{2n} \cos n \omega_b x) \quad (1)$$

で表わされるものとする。

この b による地上コイル1個あたりの鎖交磁束数 Φ は、車両の浮上状態に応じて、次の3つのケースが生ずる。

ケース I ($0 \leq h \leq w$ の場合)

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1}{w} \int_{l/2-h}^{l/2} \left(z + h - \frac{l}{2} \right) \int_{x_0-z}^{x_0+z} b dx \cdot dz \\ &= \frac{B_0 h^2}{6w} (3l - 2h) + \frac{2}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{n0}}{(n \omega_b)^2} \\ &\quad \cdot [(1 - \cos n \omega_b h) \sin n \omega_b (l/2) \\ &\quad - (n \omega_b h - \sin n \omega_b h) \cos n \omega_b (l/2)] \dots \dots (2) \end{aligned}$$

ケース II ($w < h \leq a - w$ の場合)

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1}{w} \int_{l/2-w}^{l/2} \left(z + h - \frac{l}{2} \right) \int_{x_0-z}^{x_0+z} b dx \cdot dz \\ &= B_0 \left[\left(\frac{2}{3} w - h - \frac{1}{2} l \right) w + h l \right] \end{aligned}$$

第5図 地上電機子コイル1相分の展開図

Fig. 5. Analytic diagram about one phase of armature coil.

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{n0}}{(n\omega_b)^2} \left\{ [1 - \cos n\omega_b w] \right. \\
 & + n\omega_b(h-w) \sin n\omega_b w \sin n\omega_b(l/2) \\
 & - \{n\omega_b h - \sin n\omega_b w \\
 & \left. - n\omega_b(h-w) \cos n\omega_b w \cos n\omega_b \frac{l}{2}\} \right\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

ケース III ($a-w < h \leq a$ の場合)

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \frac{1}{w} \int_{l/2-w}^{h-a+l/2} (2z+a-l) \int_{x_0-z}^{x_0+z} b dx \cdot dz \\
 &+ \frac{1}{w} \int_{h-a+l/2}^{l/2} \left(z+h-\frac{l}{2} \right) \int_{x_0-z}^{x_0+z} b dx \cdot dz \\
 &= B_0[(a-w)(l-w) + (w^2/3)] \\
 &+ (B_0/6w)(a-h)^2(2a-2h-2l) \\
 &+ \frac{2}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{n0}}{(n\omega_b)^2} \left\{ [1 + \cos n\omega_b(a-h) \right. \\
 &- 2 \cos n\omega_b w \\
 &+ n\omega_b(a-2w) \sin n\omega_b w \sin n\omega_b \frac{l}{2} \\
 &- \{n\omega_b h + \sin n\omega_b(a-h) - 2 \sin n\omega_b w \\
 &\left. - n\omega_b(a-2w) \cos n\omega_b w \cos n\omega_b \frac{l}{2}\} \right\} \\
 &\dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

ただし、

$$K_{n0} = \frac{B_{1n} \sin n\omega_b x_0 + B_{2n} \cos n\omega_b x_0}{n\omega_b} \dots (5)$$

ここで、車両の移動速度、すなわち車上界磁の x 方向の移動速度を v とすると、 x_0 は時間 t の関数であり、

$$x_0 = vt, \quad \omega_b x_0 = \omega_b v t = \omega t \dots\dots\dots (6)$$

とおくことができるから、

$$K_{n0} = \frac{B_{1n} \sin \omega t + B_{2n} \cos \omega t}{n\omega_b} \dots\dots (7)$$

と書くことができる。

ところで、リニアモータが連続的に推進力あるいは回生ブレーキ力を発生するためには、電源から地上コイルに流す電流 i が、上記 Φ の変化と完全に同期が

とれていなければならないから、 i の一般形は次式ようになる。

$$\begin{aligned}
 i &= I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{I_{1n} \sin n(\omega t - \delta) \\
 &+ I_{2n} \cos n(\omega t - \delta)\} \dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

いま、地上コイル巻数を N 、界磁極数を M とすると、地上コイル1相あたりの車上界磁に働く推進力 f_d と浮上力 f_l は、それぞれ、

$$f_d = \frac{MNi}{v} \frac{d\Phi}{dt}, \quad f_l = MNi \frac{d\Phi}{dh} \dots\dots (9)$$

であり、 m 相分合成した平均値 F_d および F_l は、それぞれ、

$$F_d = \frac{m}{T} \int_0^T f_d dt, \quad F_l = \frac{m}{T} \int_0^T f_l dt \dots (10)$$

である。この推進力（あるいは回生ブレーキ力） F_d および浮上力 F_l を、(2)~(8)式の条件のもとに、具体的に計算してみると、それぞれ、次のようになる。

ケース I の場合

$$\begin{aligned}
 F_d &= \frac{mMN}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\omega_b)^2} \left\{ [1 - \cos n\omega_b h] \sin n\omega_b(l/2) \right. \\
 &- (n\omega_b h - \sin n\omega_b h) \cos n\omega_b(l/2) \\
 &\cdot [(B_{1n} I_{2n} - B_{2n} I_{1n}) \cos n\delta \\
 &\left. - (B_{1n} I_{1n} + B_{2n} I_{2n}) \sin n\delta \right] \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_l &= \frac{mMN}{w} \left\{ B_0 I_0 h(l-h) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\omega_b)^2} \right. \\
 &\cdot \left\{ \sin n\omega_b h \sin n\omega_b \frac{l}{2} + (\cos n\omega_b h - 1) \right. \\
 &\cdot \cos n\omega_b \frac{l}{2} \} \cdot \{ (B_{1n} I_{1n} + B_{2n} I_{2n}) \cos n\delta \\
 &\left. + (B_{1n} I_{2n} - B_{2n} I_{1n}) \sin n\delta \right\} \dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

ケース II の場合

$$\begin{aligned}
 F_d &= \frac{mMN}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\omega_b)^2} \left\{ [1 - \cos n\omega_b w] \right. \\
 &+ n\omega_b(h-w) \sin n\omega_b w \sin n\omega_b(l/2) \\
 &- \{n\omega_b h - \sin n\omega_b w \\
 &- n\omega_b(h-w) \cos n\omega_b w \cos n\omega_b \frac{l}{2}\} \\
 &\cdot [(B_{1n} I_{2n} - B_{2n} I_{1n}) \cos n\delta \\
 &\left. - (B_{1n} I_{2n} + B_{2n} I_{1n}) \sin n\delta \right] \dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_l &= \frac{mMN}{w} \left\{ B_0 I_0 w(l-w) \right. \\
 &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\omega_b)^2} \{ \sin n\omega_b w \cdot \sin n\omega_b(l/2) \\
 &\left. + (\cos n\omega_b w - 1) \cos n\omega_b(l/2) \}
 \end{aligned}$$

$$\cdot \{ (B_{1n} I_{1n} + B_{2n} I_{2n}) \cos n\delta \\ + (B_{1n} I_{2n} - B_{2n} I_{1n}) \sin n\delta \} \} \dots \dots \dots (14)$$

ケース III の場合

$$F_d = \frac{m M N}{w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\omega_b)^2} \left[\{ 1 + \cos n\omega_b(a-h) \right. \\ - 2 \cos n\omega_b w + n\omega_b(a-2w) \sin n\omega_b w \} \\ \cdot \sin n\omega_b \frac{l}{2} - \{ n\omega_b h + \sin n\omega_b(a-h) \\ - 2 \sin n\omega_b w - n\omega_b(a-2w) \cos n\omega_b w \} \\ \cdot \cos n\omega_b \frac{l}{2} \} \cdot \{ (B_{1n} I_{2n} - B_{2n} I_{1n}) \cos n\delta \\ - (B_{1n} I_{1n} + B_{2n} I_{2n}) \sin n\delta \} \dots \dots \dots (15)$$

$$F_l = \frac{m M N}{w} \left[B_0 I_0 (a-h)(l-a+h) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\omega_b)^2} \right. \\ \cdot \{ \sin n\omega_b(a-b) \sin n\omega_b(l/2) \\ + \{ \cos n\omega_b(a-h) - 1 \} \cos n\omega_b(l/2) \} \\ \cdot \{ (B_{1n} I_{1n} + B_{2n} I_{2n}) \cos n\delta \\ + (B_{1n} I_{2n} - B_{2n} I_{1n}) \sin n\delta \} \} \dots \dots \dots (16)$$

これらの式を用いることにより、磁束分布、電流波形、車上界磁と地上コイルの相対位置、地上コイルの巻数などが与えられれば、リニアモータの推進力および浮上力を求めることができる。

しかし、地上コイルの巻幅 w が十分小さく、地上コイルを細い 1 本の線のループと考えてよいような場合には、ケース II の式において $w \rightarrow 0$ とおくと、次のように、 F_d および F_l の近似式が求まる。

$$F_d = m M N h \sum_{n=1}^{\infty} \{ (B_{1n} I_{2n} - B_{2n} I_{1n}) \cos n\delta \\ - (B_{1n} I_{1n} + B_{2n} I_{2n}) \sin n\delta \} \sin n\omega_b \frac{l}{2} \\ \dots \dots \dots (17)$$

$$F_l = m M N B_0 I_0 l + m M N \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\omega_b} \\ \cdot \{ (B_{1n} I_{1n} + B_{2n} I_{2n}) \cos n\delta \\ + (B_{1n} I_{2n} - B_{2n} I_{1n}) \sin n\delta \} \sin n\omega_b \frac{l}{2} \\ \dots \dots \dots (18)$$

第 6 図 磁束分布台形波の場合の推進力特性
Fig. 6. Thrust characteristics of linear synchronous motor with keystone wave flux distribution.

第 1 表 具体的な解析波形例

Table 1. Examples of wave form for analysis.

記号	波 形	B_0 I_0	実効値 I_{eff}	記号	波 形	B_0 I_0	実効値 I_{eff}	記号	波 形	B_0 I_0	B_{1n} I_{1n}
A		0	X	A'		X	$\sqrt{2} X$	A''		$\lambda_d c X$	$\frac{2X}{n\pi} (1 - \cos n\pi)$
B		0	$\frac{\sqrt{7}}{3} X$	B'		X	$\frac{\sqrt{14}}{3} X$	B''		$\lambda_d c X$	$\frac{12X}{(n\pi)^2} \sin \frac{n\pi}{6} (1 - \cos n\pi)$
C		0	$\frac{1}{\sqrt{3}} X$	C'		X	$\frac{2}{\sqrt{3}} X$	C''		$\lambda_d c X$	$\frac{8X}{(n\pi)^2} \sin \frac{n\pi}{2}$
D		0	$\frac{1}{\sqrt{2}} X$	D'		X	$\sqrt{\frac{3}{2}} X$	D''		$\lambda_d c X$	$n=1$ のとき X $n \geq 2$ のとき 0
E		0	$\sqrt{\frac{3}{3}} X$	E'		X	$\sqrt{\frac{5}{3}} X$	E''		$\lambda_d c X$	$\frac{2X}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} (1 - \cos n\pi)$

ここで、リニアモータとしての実用性を考慮した数値計算例を示す。地上コイル設計例として 180 度巻 ($\omega_0 = \pi/l$)、磁束分布および地上コイル電流波形例として、方形波、台形波、三角波、正弦波、および 120 度方形波(第 1 表参照)を選び、計算した結果を第 6 図、第 7 図および第 2 表に示す。磁束分布〔B'〕の場合のみを代表例として図示し、その他の波形については、紙面の都合上、特定のポイントのみをひろって表にまとめた。

第 6 図は δ を変えた場合の推進力 F_d の変化状況を、 $\omega \rightarrow 0$ の場合の式を使い、電流波形をパラメータにとって示したものである。同図右上の曲線は、特に $\delta = -90$ 度の場合に ω を 0 から $a/2$ まで変えたときの F_d の変化状況を示している。

第 7 図は、第 6 図と同様な主旨で浮上力 F_l の変化状況を示したものである。ただ、右上の曲線は $\delta = 0$ 度と $\delta = 90$ 度の場合について画いている。

第 2 表は磁束分布 b と地上コイル電流 i の波形の全組合せについて、 $\delta = -90$ 度および $\delta = -90 \pm 20$ 度の場合の F_d および F_d/I_{eff} 、ならびに、 $\delta = \pm 180$ 度の場合の F_l および F_l/I_{eff} の値を示したものである。

これらの数値計算例からいろいろの事がいえるが、その主なものを列挙してみると次のようである。

(1) 推進力、浮上力ともに δ の値により変化し、推進力は $\delta = -90$ 度のとき正側に最大値をとり、 $\delta = 90$ 度のとき負側に最大値(回生ブレーキ力)をとる。また、浮上力は、 $\delta = 0$ 度のとき最大、 $\delta = \pm 180$ 度のとき最小となる。

第 7 図 磁束分布台形波の場合の浮上力特性

Fig. 7. Suspension force characteristics of linear synchronous motor with keystone wave flux distribution.

(2) 磁束分布 b および地上コイル電流 i の中の直流分は、浮上力 F_l の平均値 ($\delta = \pm 90$ 度のときの F_l の値)に影響し、交流分は推進力 F_d の値および浮上力 F_l の変化分(δ を変えた場合の)に影響する。したがって、大きな推進力を出せる電流波形は一般に浮上力の変化分が大きく、両方有利な条件にすることは難しい。

(3) 上記のことから、地上コイル電流 i の直流分と交流分を別々に調節できる電源を用意すれば、推進力と浮上力を独立に制御できる推進浮上兼用リニアモータを作り得る。

(4) 電流 i の交流分の波高値を同じにとった場合、方形波が最も大きな推進力を出し得るが、単位電

第 2 表 同期形推進浮上兼用リニアモータの推進力と浮上力

Table 2. Thrust and suspension force of linear synchronous motor for both propulsion and suspension.

磁束分布	電流波形	$\delta = -90^\circ$ の場合		$\delta = -90^\circ \pm 20^\circ$ の場合		$\delta = \pm 180^\circ$ の場合	
		F_d	F_d/I_{eff}	F_d	F_d/I_{eff}	F_l	F_l/I_{eff}
A'	A	2.00	2.00	1.56	1.56	-0.500	-0.500
	A'		1.41	1.10	1.10	0.500	0.354
	B	1.67	1.89	1.72	1.72	-0.481	-0.546
	B'		1.34	1.22	1.22	0.519	0.416
	C	1.00	1.73	1.65	1.65	-0.333	-0.577
	C'		0.87	0.82	0.82	0.667	0.577
	D	1.27	1.80	1.69	1.69	-0.405	-0.573
	D'		1.04	0.98	0.98	0.595	0.486
	E	1.41	1.15	1.08	1.08	-0.447	-0.365
	E'		1.09	1.02	1.02	0.553	0.428
B'	A	1.67	1.67	1.52	1.52	-0.481	-0.481
	A'		1.18	1.07	1.07	0.519	0.367
	B	1.55	1.76	1.62	1.62	-0.463	-0.525
	B'		1.25	1.14	1.14	0.537	0.431
	C	0.96	1.67	1.58	1.58	-0.316	-0.548
	C'		0.83	0.79	0.79	0.684	0.592
	D	1.22	1.72	1.62	1.62	-0.387	-0.547
	D'		0.99	0.93	0.93	0.613	0.500
	E	1.34	1.09	1.03	1.03	-0.427	-0.348
	E'		1.04	0.98	0.98	0.573	0.444
C'	A	1.00	1.00	0.95	0.95	-0.333	-0.338
	A'		0.71	0.67	0.67	0.667	0.471
	B	0.96	1.09	1.04	1.04	-0.316	-0.359
	B'		0.77	0.73	0.73	0.684	0.548
	C	0.66	1.14	1.07	1.07	-0.208	-0.361
	C'		0.57	0.53	0.53	0.792	0.686
	D	0.81	1.15	1.08	1.08	-0.258	-0.365
	D'		0.66	0.62	0.62	0.742	0.606
	E	0.89	0.73	0.69	0.69	-0.284	-0.232
	E'		0.69	0.65	0.65	0.716	0.554
D'	A	1.27	1.27	1.20	1.20	-0.405	-0.405
	A'		0.90	0.85	0.85	0.595	0.421
	B	1.22	1.38	1.30	1.30	-0.387	-0.439
	B'		0.97	0.92	0.92	0.613	0.491
	C	0.81	1.40	1.32	1.32	-0.258	-0.447
	C'		0.70	0.66	0.66	0.742	0.643
	D	1.00	1.41	1.33	1.33	-0.318	-0.450
	D'		0.82	0.77	0.77	0.682	0.557
	E	1.10	0.90	0.85	0.85	-0.351	-0.287
	E'		0.85	0.80	0.80	0.649	0.503
E'	A	1.41	1.41	1.32	1.32	-0.447	-0.447
	A'		0.99	0.93	0.93	0.553	0.391
	B	1.34	1.52	1.43	1.43	-0.427	-0.484
	B'		1.07	1.01	1.01	0.573	0.460
	C	0.89	1.55	1.45	1.45	-0.284	-0.493
	C'		0.77	0.73	0.73	0.716	0.620
	D	1.10	1.56	1.47	1.47	-0.351	-0.496
	D'		0.90	0.85	0.85	0.649	0.530
	E	1.22	0.99	0.93	0.93	-0.387	-0.316
	E'		0.94	0.89	0.89	0.613	0.475

流(実効値)当りの推進力*で比較すると、必ずしも方形波有利ではない。 δ が -90 度からずれた場合の F_d の低下率、 w の影響、磁束分布 b の影響、推進力および浮上力の脈動率**などを考えると、正弦波形が有利な要素が多い。

4. 推進浮上兼用リニアモータ適用領域の検討

〈4・1〉 高速列車の走行抵抗と推進力・浮上力比

高速列車の走行抵抗については、在来鉄道および新幹線鉄道の実験データならびに理論解析の両面から検討を行ない、下記の計算式が提案されている⁽⁶⁾。

トンネル外 (kg)

$$(1.2 + 0.022V)W + (0.013 + 0.00029L)V^2$$

トンネル内 (2km 程度) (kg)

$$(1.2 + 0.022V)W + (0.050 + 0.00034L)V^2$$

トンネル内 (40km 程度) (kg)

$$(1.2 + 0.022V)W + (0.050 + 0.00050L)V^2$$

..... (19)

ただし、 V : 列車速度 (km/h), W : 列車重

量 (t), L : 列車長 (m)

これらの式の第1項は、いずれも現在方式の鉄道における車輪支持の機械抵抗であり、浮上式鉄道においては無視してよい項である。したがって、浮上式鉄道における高速列車の走行抵抗は、(19)式の第2項で算出される空気抵抗と、一部の浮上方式において必要となる磁気抗力などの和で表わされる。本論文では、推進浮上兼用のリニアモータを使用した高速鉄道を検討の対象にしているから、とりあえず、空気抵抗のみを走行抵抗と考え、論議をすすめることにする。

第8図は現在の東海道および山陽新幹線において用いられている車両とまったく同じ形状の車両を、8～16両編成した場合の、走行抵抗を計算した結果を示したものである。空気抵抗は列車速度の2乗に比例して増加するため、高速領域においては非常に大きな走行抵抗になる。

第8図 高速運転時における列車速度と走行抵抗

Fig. 8. Relation between train speed and train resistance.

第9図 列車速度と浮上力・推進力比

Fig. 9. Relation between train speed and suspension force thrust ratio.

いま、車両重量を1両あたり 40 t、最高速度における加速用推力を約 0.03 g と仮定し、これと上述の走行抵抗とから所要の浮上力・推進力比 ($F_t/F_d = K_F$) を計算してみると、第9図のようになる。

〈4・2〉 推進浮上兼用リニアモータの適用領域について 前節で解析したように、同期形推進浮上兼用リニアモータの推進力、浮上力特性は、磁束分布および地上コイル電流の波形により絶対値は異なるが、全体として第6図および第7図に示したような傾向をもっている。

*: 地上一次式のリニアモータにおいては、延々と布設される地上コイル列を、ある一定区間 (1～2 km) ごとに電氣的に区分し、列車の進行に合わせて所要の区間の地上コイルを励磁するようなセクション切換え制御を行なう。そのため、列車の進行に伴う1回の地上コイル通電時間は非常に短かく (数秒～十数秒)、リニアモータ建設費の主要部分を占める地上コイル費用を低廉にするため、一般には極端な短時間定格設計とする。この場合、単位電流あたりの発生力の大小は非常に重要な事項となる。

** : 今回は数値計算例を示していないが、(9)式的具体計算を行なうことにより、推進力および浮上力の脈動率を容易に求めることができる。脈動率は正弦波が最小で (理論的には零にできる)、三角波、台形波がこれに次ぎ、方形波は非常に大きい。

いま、地上コイル 180 度巻の場合を考えてみると、推進力は $\delta = -90$ 度のとき最大値をとり、このときの値 $F_{d\max}$ は、

$$F_{d\max} = N K_{ac} B_{ac} I_{ac} h \dots\dots\dots (20)$$

ただし、 K_{ac} ：比例定数、 B_{ac} ：磁束分布交流分波高値、 I_{ac} ：地上コイル電流交流分波高値

である。前節の解析で求めた第 6 図および第 2 表の値は (20) 式で $N=1$ 、 $B_{ac}=1$ 、 $I_{ac}=1$ 、 $h=1$ とおいたときの値であり、これより磁束分布と地上コイル電流波形の種類別に K_{ac} の値を知ることができる。

一方、浮上力は $\delta=0$ のとき最大値をとり、このときの値 $F_{l\max}$ は、

$$F_{l\max} = N B_{dc} I_{dc} l + N K_l K_{ac} B_{ac} I_{ac} l \quad (21)$$

ただし、 B_{ac} ：磁束分布直流分、 I_{dc} ：地上コイル電流直流分、 K_l ：比例定数

であり、その第 1 項は δ を $-\pi \sim 0 \sim \pi$ と変えた場合の平均値を、また第 2 項は同じく変動分を表わしている。したがって、浮上力変動率 ν_l は、

$$\nu_l = \frac{N K_l K_{ac} B_{ac} I_{ac} l}{N B_{dc} I_{dc} l} = \frac{K_l K_{ac} B_{ac} I_{ac}}{B_{dc} I_{dc}} \quad (22)$$

ということになる。第 7 図および第 2 表の値は、上式で $N=1$ 、 $l=1$ 、 $B_{dc}=1$ 、 $I_{dc}=1$ 、 $B_{ac}=1$ 、 $I_{ac}=1$ とおいたときの値であり、これより各波形別に $K_l \cdot K_{ac}$ の値を知ることができる。

ここで、浮上力・推進力比 K_F を求めてみると、(20) および (21) 式より、

$$K_F = \frac{N B_{dc} I_{dc} l}{N K_{ac} B_{ac} I_{ac} h} = \frac{B_{dc} I_{dc} l}{K_{ac} B_{ac} I_{ac} h} \dots\dots\dots (23)$$

である。特に、 $B_{ac}=B_{dc}$ のときには、(22) および (23) 式より、

$$\frac{I_{ac}}{I_{dc}} = \frac{1}{K_l K_{ac}} \cdot \nu_l \dots\dots\dots (24)$$

$$\frac{l}{h} = K_F \cdot K_{ac} \cdot \frac{I_{ac}}{I_{dc}} \dots\dots\dots (25)$$

なる関係が得られる。

いま、浮上力変動率 $\nu_l=0.1$ 、浮上力・推進力比 $K_F=10$ の場合について、各波形別に I_{ac}/I_{dc} および l/h の値を計算してみると、第 3 表のようになる。表の l/h の欄をみると、磁束分布および地上コイル電流波形が方形波（第 1 表〔A'〕、〔A''〕など）の場合を除き他はほとんど、 $l/h=3.1 \sim 3.2$ の範囲にある。

$$l/h = 3.1 \sim 3.2$$

特に波形組合せの代表例として、〔A'〕-〔A''〕の組合せおよび〔D'〕-〔D''〕の組合せの場合について、 ν_l 、

第 3 表 推進浮上兼用リニアモータの地上コイル形と通電電流 ($K_F=10$ 、 $\nu_l=0.1$ の場合)

Table 3. Armature coil shape and current of linear synchronous motor for both propulsion and suspension.

磁束分布	電流波形	K_{ac}	$K_l K_{ac}$	I_{ac}/I_{dc}	λ_{dc}	l/h
A'	A'	2.00	0.500	0.200	5.00	4.00
	B'	1.67	0.481	0.208	4.81	3.47
	C'	1.00	0.333	0.300	3.33	3.00
	D'	1.27	0.405	0.247	4.05	3.14
	E'	1.41	0.447	0.224	4.46	3.15
B'	A'	1.67	0.481	0.208	4.81	3.47
	B'	1.55	0.463	0.215	4.65	3.34
	C'	0.96	0.316	0.316	3.16	3.03
	D'	1.22	0.387	0.258	3.88	3.15
	E'	1.34	0.427	0.234	4.27	3.14
C'	A'	1.00	0.333	0.300	3.33	3.00
	B'	0.96	0.316	0.316	3.16	3.04
	C'	0.66	0.208	0.481	2.08	3.17
	D'	0.61	0.258	0.388	2.58	3.14
	E'	0.89	0.284	0.352	2.84	3.13
D'	A'	1.27	0.405	0.247	4.05	3.14
	B'	1.22	0.387	0.258	3.88	3.15
	C'	0.61	0.258	0.388	2.58	3.14
	D'	1.00	0.318	0.314	3.18	3.14
	E'	1.10	0.351	0.285	3.51	3.13
E'	A'	1.41	0.447	0.224	4.46	3.15
	B'	1.34	0.427	0.234	4.27	3.13
	C'	0.89	0.284	0.352	2.84	3.13
	D'	1.10	0.351	0.285	3.51	3.13
	E'	1.22	0.387	0.258	3.88	3.15

K_F 、 I_{ac}/I_{dc} および l/h 相互の関係を求めた結果をグラフにして示すと、第 10 図および第 11 図のようである。その他の波形についての計算例は紙面の都合で割愛したが、第 3 表から類推できるように、計算してみた結果では、ほとんど〔D'〕-〔D''〕の曲線で代表できるものが多い。推進浮上兼用リニアモータを実用化することを考えると、一般的に、

- (1) 浮上力変動率 ν_l は小さい方がよい。
- (2) 直流分倍数 $\lambda_{dc}=I_{dc}/I_{ac}$ が小さい方がよい。
- (3) l/h は 1 より大の範囲で、小さい方がよい。

などの特性であることが望ましい。ここで、

(1) は当然の要求であり、力行運転領域と回生ブレーキ領域とで、浮上力が大幅に異なるようでは安定な浮上走行が困難になる。

(2) については、推進浮上兼用といってもリニアモータの主目的は推進にあり、推進力は I_{ac} で発生しているので浮上力を出すために I_{dc} をその上にさらにどれほど多く上積みする必要があるかということであり、 λ_{dc} が小で大きな浮上力が得られれば望ましいことは当然である。

(3) については、回転機の場合の研究結果はすでに何件か発表されており、たとえば、執行⁽⁷⁾、Richter 氏⁽⁸⁾らの説によれば $l/h=1 \sim 2$ 程度の値が良いといわれている。リニアモータの場合には、車上界磁に常電導界磁を使用するか、あるいは超電導界磁を使用するかによって事情は異なるが、一般的にみて、回転機の場合より幾分大きな l/h を選定する必要に迫られる場合が多いようである。

第 10 図 推進浮上兼用リニアモータの地上コイル形状と通電電流 (波形〔A'〕-〔A''〕)

Fig. 10. Armature coil shape and current of linear synchronous motor for both propulsion and suspension.

第 11 図 第 10 図と同 (波形〔D'〕-〔D''〕)

Fig. 11. Fig. 10. *ibid.*

いま、検討の目安として、 $v_t \leq 0.2$, $\lambda_{ac} \leq 3$, $l/h \leq 5$ という値を、第 10 図および第 11 図の曲線群に与えてみると、点線で囲んだ斜線領域に示すように、波形〔A'〕-〔A''〕の場合には $K_F \leq 7$ 、波形〔D'〕-〔D''〕の場合には $K_F \leq 15$ 程度でないと、それぞれ、上記の条件を満足できないことになる。

言えれば、本論文の主題である推進浮上兼用リニアモータは、一般に低速領域より高速領域に適性をもっており、上述の条件のもとでは、波形〔A'〕-〔A''〕の場合には、速度 500 km/h 以下では実用的に不経済な設備になる可能性があり、波形〔D'〕-〔D''〕の場合であっても、ほぼ 300 km/h 以上の速度領域で使用しないと、その有利性を発揮できないという結論が、第 9 図～第 11 図から導かれる。

v_t , λ_{ac} , l/h などの限界値や走行抵抗などの与え方より、その値は若干上下するにしても、推進浮上兼用リニアモータには実用的な適用速度下限値があり、それ以下の速度領域では推進系と浮上系を別々の系で構成する方が有利であるということになる。

5. あとがき

本論文で明らかにできたことは、次のようである。

(1) 地上コイルたて形配置の同期形推進浮上兼用リニアモータの推進力、浮上力特性を検討するための普遍的な計算モデルを提案し、計算式を誘導した。

(2) 上記計算モデルを用いて、実用上考え得いくつもの波形の磁束分布および地上コイル電流について、推進力および浮上力の特性を明らかにした。

(3) 上記解析結果によると、推進力および浮上力特性に与える波形の影響は、大きく、その決定にあたっては、本論文の解析結果はもちろん、このほか、電力供給系の構成、電力変換器の種類、車両の走行特性など、広範囲の検討結果を総合して考える必要がある。

(4) 本論文に述べた推進浮上兼用リニアモータはこれを浮上式鉄道に適用する場合、低速領域より高速領域において適性が高い。したがって、実用的な限界速度以下では、推進系と浮上系を分離独立させた方が有利であり、本文中に限界速度についての考察例を紹介した。第 1 章に述べたように、特性のすぐれた推進浮上兼用リニアモータが開発されれば、実用上得るところは大きい。しかし一般的には兼用形必ずしも最良ということではなく、開発のためには多方面の研究が必要であろう。その意味で本論文が研究の一助となれば幸いである。

本論文をまとめるにあたり、ご指導とご助言をいただいた鉄道技術研究所電力機械研究室 松井前室長、山添室長および室員各位、ならびに日本大学理工学部 宮城教授に謝意を表する。

(昭和 50 年 2 月 4 日受付, 同 50 年 12 月 15 日再受付)

文 献

- (1) 奥, 他: 超高速新幹線 (昭 46-12) 中公新書
- (2) 山村: 電学誌 49, 11 (昭 49-8)
- (3) 松井, 他: 昭 46 電気四学会連大 No. 227
- (4) 松井, 他: 昭 48 電気学会全国大会 No. 653
- (5) 牧, 他: 同上 No. 649
- (6) 山本: 鉄道技研報告 916, 287 (昭 47-3)
- (7) 執行: 電気機械設計論 (1), (2), (3) (昭 26)
- (8) Richter (広瀬訳): 直流機原論 (昭 38)