Proposal of Permanent Magnet Repulsive Maglev Transportation System

—Possibility of Automobile with Magnetic Levitation—

Shin-ichi Moriyama Member (Kyushu Institute of Technology, moriyama@ces.kyutech.ac.jp)

Keywords: magnetic levitation, transportation system, permanent magnet, repulsive force, automobile

This paper describes a maglev transportation system for automobile. The track is an array of permanent magnet blocks, and the levitating body is the bedplate which consists of permanent magnet plates, propulsion coils, levitation coils and guidance coils (Fig. 1, Fig.2). The feature of this system is that the automobile equipped with the bedplate is free to approach into the track or to swerve from the track by using four wheels with the lift. The force acting on the

levitating body is calculated on the assumption that each permanent magnet can be expressed as a surface current. From the calculation results, it is proven that the automobile of 4.35 m length, 1.8 m width and 1700 kg weight can run at speed of 500 km/h against the air resistance force of 3704 N on the condition that the battery has an output of 337.5 V and a capacity of 190 Ah.

Fig. 1. Automobile with magnetic levitation

Fig. 2. Configuration of coils in the bedplate

永久磁石反発式磁気浮上輸送システムの提案

——磁気浮上式自動車の可能性——

正 員 森山 伸一*

Proposal of Permanent Magnet Repulsive Maglev Transportation System

——Possibility of Automobile with Magnetic Levitation——

Shin-ichi Moriyama*, Member

This paper describes a maglev transportation system for automobile. The track is an array of permanent magnet blocks, and the levitating body is the bedplate which consists of permanent magnet plates, propulsion coils, levitation coils and guidance coils. The feature of this system is that the automobile equipped with the bedplate is free to approach into the track or to swerve from the track by using four wheels with the lift. The force acting on the levitating body is calculated on the assumption that each permanent magnet can be expressed as a surface current. From the calculation results, it is proven that the automobile of 4.35 m length, 1.8 m width and 1700 kg weight can run at speed of 500 km/h against the air resistance force of 3704 N on the condition that the battery has an output of 337.5 V and a capacity of 190 Ah.

キーワード：磁気浮上，搬送システム，永久磁石，反発力，自動車

Keywords: magnetic levitation, transportation system, permanent magnet, repulsive force, automobile

1. はじめに

最近、磁気浮上技術を利用した鉄道輸送システムの商業化が急速に進んでいる。リニモ (HSST) は 2005 年に開催予定の愛知万博における新交通システムの一つとして注目を集めている⁽¹⁾。リニモはリニアインダクションモータ (LIM) を用いた常電導電磁石吸引式リニアモータカーであり、最高速度は 100 km/h と低い、低騒音性、快適性の特長を活かした観客輸送機関として位置付けられている。同じ常電導電磁石吸引方式のリニアモータカーであるトランスラピッド⁽²⁾は、リニアシンクロナスモータ (LSM) の採用により、高速性を追求した輸送システムである。世界初の商業用リニアモータカーとして 2002 年に上海で営業を開始し、最高速度 430 km/h の運行を実現している。JR 東海の磁気浮上式リニアモータカー⁽³⁾は超電導電磁石と LSM を組み合わせた輸送システムである。山梨実験線において陸上交通機関での世界最速記録 581 km/h を達成しており、リニア中央新幹線構想の実現が待たれるところである。

本論文では、上述の磁気浮上技術応用における新たな展開を踏まえ、新交通システムとして磁気浮上式の自動車を

可能かどうかを数値計算により検討する。磁気浮上走行路は現状の高速自動車道とし、一般道は車輪による走行を仮定する。それゆえ、磁気浮上走行路への進入とそこからの離脱は自由でなければならない。このため、吊り下げ構造の常電導電磁石吸引方式は利用できない。また、超電導電磁石反発方式は構造上適用可能であるが、冷凍設備を自動車に搭載しなければならず、非現実的である。そこで、永久磁石反発方式をベースとする磁気浮上輸送システムを提案する。低騒音性と快適性は、近年の電気自動車実用化の動向⁽⁴⁾からすると、必須の条件であり、性能に関する目標事項とは考えにくい。それゆえ、高速性に重点を置き、モータを車上 1 次方式の LSM とする。すなわち、永久磁石を道路に埋設し、浮上と推進に利用する。地上 1 次方式は、電力供給と位置・速度制御のための設備を道路側に設ける必要があるため、検討の対象から外す。

2. システム構成と計算モデル

〈2・1〉永久磁石の構成 提案する磁気浮上輸送システムの永久磁石の構成を図 1 に示す。走行路は永久磁石ブロックのアレイで構成する。上面を全て同極 (図 1 では N 極) とすることで浮上と推進に利用できる。ブロックの断面は一辺が A の正方形とし、ブロック間の間隙も A とする。したがって、LSM のピッチは $2A$ となる。ブロックの幅 W と辺の長さ A は車両の標準的なスケールを参考にし

* 九州工業大学
〒820-8502 飯塚市大字川津 680-4
Kyushu Institute of Technology
680-4, Kawazu, Iizuka 820-8502

て定める。なお、走行路は直線とし、その全長は無限長道路とみなせる程度に長く設定する。浮上体は4枚の永久磁石プレートで構成する。プレートに作用する反発力は、厚さ t 、長さ a 、幅 b 、左右の間隙 c 、前後の間隙 d 、および、ブロックとの間隙に依存する。これらのパラメータは、車両の重量や車両と道路の間のギャップを考慮して定める。特に a と d については、アレイ構造に起因する走行時の浮上力の脈動と前後の浮上力のアンバランス（ピッチングトルク）が最小となるよう配慮する。

永久磁石の磁化特性は直線で近似できるものとする。この場合、磁化の強さ M は磁束密度 B に関する1次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$M = \frac{4\mu_0(BH)_{\max}}{B_r} + \left(1 - \frac{4\mu_0(BH)_{\max}}{B_r^2}\right)B \dots\dots\dots (1)$$

μ_0 : 真空透磁率, $(BH)_{\max}$: 最大エネルギー積,
 B_r : 留磁束密度

高性能永久磁石として注目を集めているNd-Fe-B系焼結磁石では、量産レベルで最大エネルギー積 400 kJ/m^3 、残留磁束密度 1.43 T の性能が期待できる⁽⁶⁾。これらの値を(1)式に代入すると、 $M = 1.41 + 0.0168B$ となり、磁束密度に対する依存性は弱く、磁化の強さはほぼ一定と考えてよい。本論文では $M = 1.41$ として後述の計算を行う。

永久磁石は、その磁化の強さが一定であれば、表面電流で近似できる⁽⁵⁾。永久磁石プレートは、厚さ t の薄い板であるから、その側面に流れるフィラメント電流 $I (= Mt/\mu_0)$ で表現する。また、永久磁石ブロックは、厚さ A の角柱であるから、厚さ t の薄い板を積層したものとみなし、 $K (= A/t)$

本のフィラメント電流で表現する。この場合、走行路による磁界は、固定座標系 (X, Y, Z) を用いて以下のような手順で求めることができる。最初に、その上面の中心が固定座標系の原点と一致する永久磁石ブロックの k 番目のフィラメント電流について考える。この電流は $Z = t/2 - kt$ に位置する短辺 A 、長辺 W の長方形電流であるから、ビオ-サバルの法則を適用して各辺の電流が作る磁界の X, Y, Z 成分を求め、成分ごとに加算する。結果として、

$$H_X^{(k)}(X, Y, Z) = \frac{I}{4\pi} \left[-\frac{Z_k}{X_+^2 + Z_k^2} \{V_+(X_+) + V_-(X_+)\} + \frac{Z_k}{X_-^2 + Z_k^2} \{V_+(X_-) + V_-(X_-)\} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$H_Y^{(k)}(X, Y, Z) = \frac{I}{4\pi} \left[-\frac{Z_k}{Y_+^2 + Z_k^2} \{U_+(Y_+) + U_-(Y_+)\} + \frac{Z_k}{Y_-^2 + Z_k^2} \{U_+(Y_-) + U_-(Y_-)\} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$H_Z^{(k)}(X, Y, Z) = \frac{I}{4\pi} \left[\frac{X_+}{X_+^2 + Z_k^2} \{V_+(X_+) + V_-(X_+)\} + \frac{X_-}{X_-^2 + Z_k^2} \{V_+(X_-) + V_-(X_-)\} + \frac{Y_+}{Y_+^2 + Z_k^2} \{U_+(Y_+) + U_-(Y_+)\} + \frac{Y_-}{Y_-^2 + Z_k^2} \{U_+(Y_-) + U_-(Y_-)\} \right] \dots\dots\dots (4)$$

$$U_i(Y_j) = \frac{X_i}{\sqrt{X_i^2 + Y_j^2 + Z_k^2}}, \quad (i, j = +, -),$$

$$V_i(X_j) = \frac{Y_i}{\sqrt{X_j^2 + Y_i^2 + Z_k^2}}, \quad (i, j = +, -),$$

$$X_+ = A/2 + X, \quad X_- = A/2 - X, \quad Y_+ = W/2 + Y,$$

$$Y_- = W/2 - Y, \quad Z_k = kt - t/2 + Z$$

を得る。次に、 K 本のフィラメント電流が作る磁界を重ね合わせの定理により

$$H_i(X, Y, Z) = \sum_{k=1}^K H_i^{(k)}(X, Y, Z), \quad (i = X, Y, Z) \dots\dots\dots (5)$$

で表現し、これを考察の対象としている永久磁石ブロックが作る磁界とみなす。最後に、(5)式の $H_i(X, Y, Z)$ を走行路の n 番目の永久磁石ブロックが作る磁界 $H_i^{(n)}(X, Y, Z)$ に拡張する。この拡張は、走行路の永久磁石ブロックの数が201個であるとする、(2)~(4)式において X_+, X_- をそれぞれ $X_{+n} = A/2 + X - 2(n-101)A$, $X_{-n} = A/2 - X + 2(n-101)A$ に置き換えることで完了する。磁界 $H_i^{(n)}(X, Y, Z)$ を用いると、走行路による磁界は

$$H_i(X, Y, Z) = \sum_{n=1}^{201} H_i^{(n)}(X, Y, Z), \quad (i = X, Y, Z) \dots\dots\dots (6)$$

図1 永久磁石の構成
Fig. 1. Structure of permanent magnets.

で表現できる。

〈2・2〉 反発力の計算式 反発力の計算には、図 1 に示すような移動座標系 (x, y, z) を用いる。ここで、 p は浮上体の走行位置、 s は案内方向のシフト量、 h は浮上体の高さ、 h_0 は積載物を含めた重心位置を定めるパラメータである。浮上体の傾きは、移動座標系の x 軸回りの回転角 α 、 y 軸回りの回転角 β 、あるいは、 z 軸回りの回転角 γ のいずれかで表現する。この移動座標系を用いると、走行路による磁界の各成分は次のように表される。

1) x 軸回りの回転 (ローリング)

固定座標系と移動座標系の関係は

$$X = x + p \cdots \cdots \cdots (7)$$

$$Y = y \cos \alpha - z \sin \alpha + s \cdots \cdots \cdots (8)$$

$$Z = z \cos \alpha + y \sin \alpha + h \cdots \cdots \cdots (9)$$

で与えられる。また、磁界成分に関しては

$$H_X(X, Y, Z) = H_x(x, y, z) \cdots \cdots \cdots (10)$$

$$H_Y(X, Y, Z) = H_y(x, y, z) \cos \alpha - H_z(x, y, z) \sin \alpha \cdots \cdots \cdots (11)$$

$$H_Z(X, Y, Z) = H_z(x, y, z) \cos \alpha + H_y(x, y, z) \sin \alpha \cdots \cdots \cdots (12)$$

が成立するから、これらを変形し、

$$H_x(x, y, z) = H_X(X, Y, Z) \cdots \cdots \cdots (13)$$

$$H_y(x, y, z) = H_Y(X, Y, Z) \cos \alpha + H_Z(X, Y, Z) \sin \alpha \cdots \cdots \cdots (14)$$

$$H_z(x, y, z) = H_Z(X, Y, Z) \cos \alpha - H_Y(X, Y, Z) \sin \alpha \cdots \cdots \cdots (15)$$

を得る。

2) y 軸回りの回転 (ピッチング)

同様に

$$X = x \cos \beta + z \sin \beta + p \cdots \cdots \cdots (7')$$

$$Y = y + s \cdots \cdots \cdots (8')$$

$$Z = z \cos \beta - x \sin \beta + h \cdots \cdots \cdots (9')$$

$$H_X(X, Y, Z) = H_x(x, y, z) \cos \beta + H_z(x, y, z) \sin \beta \cdots \cdots \cdots (10')$$

$$H_Y(X, Y, Z) = H_y(x, y, z) \cdots \cdots \cdots (11')$$

$$H_Z(X, Y, Z) = H_z(x, y, z) \cos \beta - H_x(x, y, z) \sin \beta \cdots \cdots \cdots (12')$$

であるから、

$$H_x(x, y, z) = H_X(X, Y, Z) \cos \beta - H_Z(X, Y, Z) \sin \beta \cdots \cdots \cdots (13')$$

$$H_y(x, y, z) = H_Y(X, Y, Z) \cdots \cdots \cdots (14')$$

$$H_z(x, y, z) = H_Z(X, Y, Z) \cos \beta + H_X(X, Y, Z) \sin \beta \cdots \cdots \cdots (15')$$

を得る。

3) z 軸回りの回転 (ヨーイング)

同様に

$$X = x \cos \gamma - y \sin \gamma + p \cdots \cdots \cdots (7'')$$

$$Y = y \cos \gamma + x \sin \gamma + s \cdots \cdots \cdots (8'')$$

$$Z = z + h \cdots \cdots \cdots (9'')$$

$$H_X(X, Y, Z) = H_x(x, y, z) \cos \gamma - H_y(x, y, z) \sin \gamma \cdots \cdots \cdots (10'')$$

$$H_Y(X, Y, Z) = H_y(x, y, z) \cos \gamma + H_x(x, y, z) \sin \gamma \cdots \cdots \cdots (11'')$$

$$H_Z(X, Y, Z) = H_z(x, y, z) \cdots \cdots \cdots (12'')$$

であるから、

$$H_x(x, y, z) = H_X(X, Y, Z) \cos \gamma + H_Y(X, Y, Z) \sin \gamma \cdots \cdots \cdots (13'')$$

$$H_y(x, y, z) = H_Y(X, Y, Z) \cos \gamma - H_X(X, Y, Z) \sin \gamma \cdots \cdots \cdots (14'')$$

$$H_z(x, y, z) = H_Z(X, Y, Z) \cdots \cdots \cdots (15'')$$

を得る。

永久磁石プレートを符号も含めたフィラメント電流 i ($= -I$) で表現すると、その電流素片ベクトル idl に作用する微小の力とトルクは、走行路による磁界ベクトル $\mathbf{H}$ を用いて、それぞれ $d\mathbf{F} = idl \times \mu_0 \mathbf{H}$ 、 $d\mathbf{T} = \mathbf{r} \times d\mathbf{F}$ で表現できる。ここで、 $\mathbf{r}$ は移動座標系における電流素片の位置ベクトルである。したがって、永久磁石プレートに作用する反発力の各成分 F_x (推進力)、 F_y (案内力)、 F_z (浮上力) と各軸回りのトルク T_α (ローリングトルク)、 T_β (ピッチングトルク)、 T_γ (ヨーイングトルク) は以下のようにその電流路に沿った積分の形式で与えられる。

$$F_x = \mu_0 i \int_{y_0}^{y_1} \{H_z(x_1, y, z_0) - H_z(x_0, y, z_0)\} dy \cdots \cdots \cdots (16)$$

$$F_y = \mu_0 i \int_{x_0}^{x_1} \{H_z(x, y_1, z_0) - H_z(x, y_0, z_0)\} dx \cdots \cdots \cdots (17)$$

$$F_z = \mu_0 i \left[\int_{x_0}^{x_1} \{H_y(x, y_0, z_0) - H_y(x, y_1, z_0)\} dx + \int_{y_0}^{y_1} \{H_x(x_0, y, z_0) - H_x(x_1, y, z_0)\} dy \right] \cdots \cdots \cdots (18)$$

$$T_\alpha = \mu_0 i \left[\int_{x_0}^{x_1} \{y_0 H_y(x, y_0, z_0) - y_1 H_y(x, y_1, z_0)\} dx + \int_{y_0}^{y_1} \{H_x(x_0, y, z_0) - H_x(x_1, y, z_0)\} y dy \right] - z_0 F_y \cdots \cdots \cdots (19)$$

$$T_\beta = \mu_0 i \left[\int_{x_0}^{x_1} \{H_y(x, y_1, z_0) - H_y(x, y_0, z_0)\} x dx + \int_{y_0}^{y_1} \{x_1 H_x(x_1, y, z_0) - x_0 H_x(x_0, y, z_0)\} dy \right] + z_0 F_x \quad (20)$$

$$T_\gamma = \mu_0 i \left[\int_{x_0}^{x_1} \{H_z(x, y_1, z_0) - H_z(x, y_0, z_0)\} x dx + \int_{y_0}^{y_1} \{H_z(x_0, y, z_0) - H_z(x_1, y, z_0)\} y dy \right] \quad (21)$$

ここで、電流路の4つのコーナーの座標は (x_1, y_1, z_0) , (x_1, y_0, z_0) , (x_0, y_1, z_0) , (x_0, y_0, z_0) で表している。ただし、 $y_1 > y_0$, $x_1 > x_0$ である。たとえば、 (x, y) 座標の第1象限に位置するプレートについては、 $x_1 = a + d/2$, $x_0 = d/2$, $y_1 = b + c/2$, $y_0 = c/2$, $z_0 = -(h_0 + 3t/2)$ のように設定する。

〈2・3〉 コイルの構成 永久磁石の反発力の低下を避けるため、コイルは空心とする。コイルの構成を図2に示す。1~4は案内コイル、5~10は推進コイルである。これらのコイルは永久磁石プレート直下の同一平面上に配置する。浮上コイルは、図1の永久磁石システムが浮上方向に安定であると仮定し、ここでは省略する。コイルはその起磁力に相当するフィラメント電流で表現する。コイル電流は、電流路に付した矢印で示されている通り、 z 軸に対して右回りを正とする。なお、コイルの断面は一辺が t の正方形とする。

案内コイルは、永久磁石と同様に、前後左右に4個配置する。 $b + c = W$ と設定すれば、各案内コイルの中心は走行路のエッジと一致する。この場合、コイル電流を

$$i_1 = -i_2 = i_3 = -i_4 = -I_0 \quad (22)$$

とすることで案内力を、また、

$$i_1 = -i_2 = -i_3 = i_4 = -I_0 \quad (23)$$

とすることでヨーイングトルクを発生させることができる。推進コイルは案内コイルの間に配置される。したがって、幅 w の最大値は $w = c - 2t$ で与えられる。LSMとしての相数は3であり、相間の間隙は $A/3$ となる。たとえば、 $d = A$ ならば、

図2 コイルの構成

Fig. 2. Structure of coils.

$$i_7 = i_8 = I_0 \sin(\pi p/A) \quad (24)$$

$$i_5 = i_9 = I_0 \sin(\pi p/A + 2\pi/3) \quad (25)$$

$$i_6 = i_{10} = I_0 \sin(\pi p/A + 4\pi/3) \quad (26)$$

とすることで、任意の走行位置 p において正の推進力を得ることができる。これらのコイルに作用する電磁力の計算には(16)~(21)式を使用する。ただし、 $z_0 = -(h_0 + 3t/2)$ とし、 i には $i_1 \sim i_{10}$ を代入する。

3. 計算結果

〈3・1〉 計算における条件 図1、図2の輸送システムにおいて、永久磁石ブロックの辺の長さ A を大きく取ると、推進力や浮上力の絶対値は増すが、同時にそれらの脈動も増す。推進力や浮上力の脈動は乗り心地に直結するため、最小限に抑える必要がある。普通乗用車の全長は3m~5m、また、車幅は1m~2mの範囲にあると考えてよい。ここでは、 $A = 0.3\text{m}$, $W = 1.2\text{m}$ とし、車両直下に完全に隠れるブロック数を5~8個とする。一方、永久磁石プレートについては、厚さ t , 長さ a , 幅 b を大きくすると、浮上力は増

図3 永久磁石プレートに対する反発力の走行位置依存性

Fig. 3. Dependence of repulsive force on traveling position for permanent magnet plates.

図4 永久磁石プレートに対する反発力と幅 b との関係

Fig. 4. Relation between repulsive force and width b for permanent magnet plates.

すが、同時にプレートの重量も増す。この問題は浮上体の高さ ($h-h_0$) を小さくすれば解決する。ここでは、車両と走行路との安全な間隙の確保という観点から、 $h=0.2\text{ m}$, $h_0=0.1\text{ m}$, $t=0.02\text{ m}$ とする。また、 a と b については反発力の計算結果に基づいて定める。なお、(16)~(21) 式の積分は電流路を 0.01 m 間隔で分け、台形公式を用いて計算する。また、浮上体の傾きは次節の最後に述べるばね定数の評価においてのみ考慮する。

〈3・2〉 反発力の計算 図3は4枚の永久磁石プレートに対する反発力（推進力、浮上力、ピッチングトルク）の走行位置 p に関する依存性を示している。案内シフト s は0としている。（ $s=0$ の場合、その他の力あるいはトルクは0である）。また、プレートの寸法は $a=1.5\text{ m}$, $b=0.3\text{ m}$, $c=0.6\text{ m}$, $d=0.1\text{ m}$ としている。各々の図において永久磁石ブロックのアレイ構造に起因する大きな脈動が見られる。 b と c を固定し、 a を 0.3 m ~ 2.5 m の範囲で、また、 d を 0.0 m ~ 1.2 m の範囲で変え、同様の計算を行った結果、以下のことが判明した。

- 1) 推進力と浮上力の脈動は同時に起こる。これらの脈動は $a+d$ が A の奇数倍 (0.3 m , 0.9 m , 1.5 m , ...) に等しい時に消失する。
- 2) a が A の偶数倍 (0.6 m , 1.2 m , 1.8 m , ...) の時、 d に関係なく推進力と浮上力の脈動は消失する。この状態で d が A の奇数倍に等しいと、ピッチングトルクも消失する。上記2)のピッチングトルク消失の条件は、 $d \neq 0$, すなわち、永久磁石プレートを前後に配置する必要性を示めている。

図4は4枚の永久磁石プレートに対する反発力（浮上力 [kgf] および浮上力 [kgf] / 重量 [kg] の比）と幅 b との関係を示している。ここで、案内シフト s は0としている。また、 $a=1.2\text{ m}$, 1.8 m , 2.4 m , $2b+c=1.2\text{ m}$, $d=0.3\text{ m}$ としている。この場合、前述の2)の条件から、浮上力は走行位置に依らず一定となり、それ以外の力とトルクは0となる。永久磁石の重量はその比重が 7.5 g/cm^3 であるとして評価した。なお、浮上力/重量は a には依存しない。浮上力/重量は、 b が 0.16 m の時、最大値 6.93 を示し、その後、浮上力の増加率の低下に伴って 4.05 まで減少する。この最終状態 ($b=0.6\text{ m}$) において、浮上力は最大となる。たとえば、 $a=1.2\text{ m}$ の場合、浮上力の最大値は 1750 kgf であり、普通乗用車の重量を支えるのには十分である。仮に車両の重量が 1700 kg であるとする、 $a=1.2\text{ m}$ と $b=0.56\text{ m}$, $a=1.8\text{ m}$ と $b=0.24\text{ m}$, あるいは、 $a=2.4\text{ m}$ と $b=0.17\text{ m}$ の組み合わせが考えられる。浮上力/重量は、それぞれ、 4.22 , 6.48 , 6.91 となり、永久磁石プレートの効率の点からは最後の組み合わせがベストである。ただし、車両の全長が 5 m を超えることから、この組み合わせは少々無理がある。中間の組み合わせであれば、浮上力/重量の比を大幅に低下させることなく、目標の浮上力を得ることができる。車両の全長も 4 m 程度と予想されることから、以降の検討ではこの組み合わせを採用する。

図5は4枚の永久磁石プレートに対する反発力（案内力、浮上力、ローリングトルク）と間隙 c との関係を示している。プレートの寸法は $a=1.8\text{ m}$, $b=0.24\text{ m}$, $d=0.3\text{ m}$ としているが、案内シフト s を 0.01 m としていることから、案内力とローリングトルクが新たに発生する。ただし、これらも浮上力と同様に走行位置には依存しない。案内力と浮上力は $c=0.7\text{ m}$ の後と前でそれぞれピークを持つ。2つのピーク値の比はおおよそ $1:10$ である。設定した案内シフト量が永久磁石ブロックの幅 W の1%にも満たないことから、案内シフトによる不平衡力はかなり大きいと言える。案内力/浮上力の比は間隙 c を減らせば小さくすることができる。たとえば、 $c=0.55\text{ m}$ と定めれば、案内力/浮上力はおおよそ5%と見積もれる。ただし、永久磁石プレートの浮上力に対する効率は下がる。また、下段の図から明らかのように、ローリングトルクは無視できない値を示す。ローリングトルクは $c=0.72\text{ m}$ で0となる。不平衡力に対する安定化制御の観点からすると、案内系と浮上系の相互の結合を弱めることは重要である。この点を重視し、ここでは $c=0.72\text{ m}$ と定め、永久磁石の寸法を確定する。表1はこの永久磁石プレートに対するばね定数をまとめたものである。力とトルクに対するばね定数は、それぞれ

$$k_{uw} = - \left. \frac{\partial F_u}{\partial v} \right|_{v=0}, \quad (u = x, y, z, \quad v = x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$$

$$k_{uw} = - \left. \frac{\partial T_u}{\partial v} \right|_{v=0}, \quad (u = \alpha, \beta, \gamma, \quad v = x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$$

で定義しており、その値を 0.01 m あるいは 0.01 rad の差分で近似して求めた。この表から以下の事が言える。

- 1) $k_{uu} \leq 0$ ($u = x, y, \gamma$) であるから走行系, 案内系, ヨーイング系は不安定であり, フィードバック制御が必要不可欠である。
- 2) $k_{uu} > 0$ ($u = z, \alpha, \beta$) であるから浮上系, ローリング系, ピッチング系は安定である。
- 3) ローリング系, ピッチング系, ヨーイング系は, $k_{uv} = 0$ ($u \neq v$) であるから, 独立した系とみなせる。

図5 永久磁石プレートに対する反発力と間隙 c との関係

Fig. 5. Relation between repulsive force and gap c for permanent magnet plates.

- 4) 案内系は $-k_{uv}v$ ($u = y, v = \alpha$) で近似的に表わせるような不平衡力を含むが, ローリング系が独立であるため, この力は外乱として扱える。すなわち, 案内系は独立した系とみなせる。
- 5) 走行系は $-k_{uv}v$ ($u = x, v = \beta$) で近似的に表わせるような不平衡力を含むが, ピッチング系が独立であるため, 走行系もまた独立であると考えてよい。
- 6) 浮上系は $-k_{uv}v$ ($u = z, v = y, \beta, \gamma$) で近似的に表せるような不平衡力を含むが, その他の系が全て独立であるから, 浮上系もまた独立であると考えてよい。

〈3・3〉 電磁力の計算 図2の案内コイルに(22)式で与えられるような電流を流すと, 案内力と共にローリングトルクが発生する。案内シフト s を0とし, コイルの寸法を $a = 1.8$ m, $b = 0.24$ m, $d = 0.3$ m で定めると, 案内力やローリングトルクは走行位置 p に依存せず, 一定となる。図6はこの条件の下で求めた案内コイルに対する電磁力と

図6 案内コイルに対する電磁力と間隙 c との関係

Fig. 6. Relation between electromagnetic force and gap c for guidance coils.

表1 永久磁石プレートに対するばね定数

Table 1. Stiffness for permanent magnet plates.

v	k_{xv}	k_{yv}	k_{zv}	$k_{\alpha v}$	$k_{\beta v}$	$k_{\gamma v}$
x	0.0 N/m	0.0 N/m	0.0 N/m	0.0 N	0.0 N	0.0 N
y	0.0 N/m	-1.6×10^5 N/m	0.1×10^5 N/m	0.0 N	0.0 N	0.0 N
z	0.0 N/m	0.0 N/m	1.5×10^5 N/m	0.0 N	0.0 N	0.0 N
α	0.0 N/rad	-0.2×10^5 N/rad	0.0 N/rad	0.6×10^5 Nm/rad	0.0 Nm/rad	0.0 Nm/rad
β	0.2×10^5 N/rad	0.0 N/rad	-0.3×10^5 N/rad	0.0 Nm/rad	4.0×10^5 Nm/rad	0.0 Nm/rad
γ	0.0 N/rad	0.0 N/rad	0.2×10^5 N/rad	0.0 Nm/rad	0.0 Nm/rad	-2.4×10^5 Nm/rad

図7 案内コイルに対する電磁力の走行位置依存性
Fig. 7. Dependence of electromagnetic force on traveling position for guidance coils.

図8 推進コイルに対する電磁力の走行位置依存性
Fig. 8. Dependence of electromagnetic force on traveling position for propulsive coils.

間隙 c との関係を示している。(22) 式における電流 I_0 は 1000 A とした。案内力のピークは $c = 0.96$ m で生じる。一方、ローリングトルクはその間隙長を越えた $c = 1.08$ m でほぼ 0 となる。後者の間隙長を選択すれば、案内系とローリング系を分離することができる。 $c = 1.08$ m と定め、コイル電流を (23) 式で与えると、図 7 に示すようなヨーイングトルクが発生する。前後のコイルの電流パターンが非対称であるため、ヨーイングトルクは走行位置 p に依存する。ただし、脈動の振幅は平均値の約 10% であり、ヨーイング系のフィードバック制御に大きな影響は与えないであろう。

図 2 の推進コイルに (24)~(26) 式に基づいて電流を流すと、走行位置 p にほとんど依存しない推進力を得ることができる。たとえば、 $w = 1.0$ m, $I_0 = 1000$ A, $s = 0$ とすると、図 8 に示すような推進力を得ることができる。推進力の脈動は、平均値の 1% 以下であり、無視できるレベル

図9 浮上コイルに対する電磁力の走行位置依存性
Fig. 9. Dependence of electromagnetic force on traveling position for levitation coils.

である。図 8 には推進力と共にピッチングトルクが示されている。このトルクは、走行時の縦揺れ振動を引き起こすため、除去する必要がある。除去の方法は 2 つある。1 つは、推進コイルの正弦波電流パターンにピッチングトルクをキャンセルするような電流パターンを重畳させる方法である。もう 1 つは、案内コイルの電流パターンの調節によりキャンセルする方法である。この場合、コイル電流は

$$i_1 = i_2 = -i_3 = -i_4 = I_0 \dots \dots \dots (27)$$

で与えられる。ただし、現状の案内コイルの配置では十分な浮上方向の力を発生させることができないので別のコイル、すなわち浮上コイル、を設ける。推進コイルの前後に配置することとし、その寸法を $a = 0.6$ m, $b = 0.24$ m, $c = 0.52$ m, $d = 2.7$ m と定める。たとえば、 $I_0 = 1000$ A, $s = 0$ とすると、図 9 に示すようなピッチングトルクを発生させることができる。このトルクは、前後のコイルの電流パターンが非対称であるため、走行位置 p に依存する。したがって、推進コイルのピッチングトルクをキャンセルするには、図 8 に示した依存性に合致するような電流パターンを決めることになる。

図 9 には、浮上コイルの電流を

$$i_1 = i_2 = i_3 = i_4 = -I_0 \dots \dots \dots (28)$$

で与えた場合の浮上力と (22) 式で与えた場合のローリングトルクも共に示されている (これらは走行位置 p には依存しない)。車両重量の変化、車両の重心のずれ、走行時の横風や遠心力、等々の外乱補償を振動抑制と共に実施しようとすれば、安定な浮上系、ローリング系、ピッチング系においてもフィードバック制御は必要である。この点を考慮し、本輸送システムでは、案内コイルとは別に浮上コイルを設ける方法を採用する。なお、浮上コイルの電流を (22) 式で与えた場合、図 6 から明らかなように案内力は 0 である。すなわち、電磁力の点で浮上コイルと案内コイルは互いに独立な操作コイルとみなすことができる (ただし、電磁誘導における両者間の結合は存在する)。

4. 磁気浮上式自動車の概念

3 章の計算結果に基づくコイルの配置案を図 10 に示す。前後の車輪スペースを確保するために案内コイルは 8 個に分割している (案内コイルの寸法は $a = 0.6 \text{ m}$, $b = 0.24 \text{ m}$, $c = 1.08 \text{ m}$ であり, $d = 0.3 \text{ m}$ と $d = 2.7 \text{ m}$ に 4 個ずつ配置する。推進コイルと浮上コイルの寸法に変更は無い)。これらのコイルの上に 4 枚の永久磁石プレートを重ね、炭素繊維強化樹脂 (CFRP) で一体化し、底板として自動車に組み込む。図 11 にその一例を示す。この図は、上段が車輪による通常走行時の正面図 (後輪部断面図)、下段が磁気浮上走行時の側面図 (シート部断面図) として描かれている。永久磁石ブロックの保護のため、車道の表面はブロック上面より 1 cm 高い位置にある。その結果、CFRP 底板の下面と車道表面との距離は、車輪走行時に 10 cm, 磁気浮上走行時に 5 cm となる。車輪の出し入れはモータを組み込んだリフト機構により自動的に行われる。車輪はインホイールモータ方式で構成し、4 輪駆動の車輪走行を想定する。電源は 18 個のリチウムイオン電池⁷⁾ からなる 67.5 V 出力のモジュールで構成する。側面図の前あるいは後に描かれた 5

つのモジュールは直列結線されており、出力 337.5 V, 容量 190 Ah の直流電源として用いられる。表 2 にこの自動車の設計仕様を示す。磁気浮上走行時の空気抵抗をできるだけ小さくするために、車高 (車輪部を含まない高さ) は 0.9 m としている。このため、乗車定員は 2 名に限定される。車両重量は 1700 kg であり、CFRP 底板と電池モジュールを除く重量を 630 kg で見積もっている。最高速度は、車輪走行時に 125 km/h, 磁気浮上走行時に 500 km/h とする。空気抵抗力は

$$F_{air}(V) = C_d S \frac{\rho V^2}{2} \dots \dots \dots (29)$$

の式⁸⁾を用いて評価した。ここで、空気抵抗係数 C_d は 0.2, 車両面積 S は 1.6 m^2 , 空気密度 ρ は 1.2 kg/m^3 , 車両速度 V は 500 km/h で与えた。第 37 回東京モーターショー⁹⁾ では、車両重量 700 kg, 空気抵抗係数 0.2 という軽量化と空力最適化を追求したコンセプトカーが出品されていることから、表 2 の車両重量と空気抵抗力の見積もりが非現実的ということはないであろう。

磁気浮上走行時の最高速度と走行距離は電源として使用する電池モジュールの容量で制限される。500 km/h の速度で走行する際に必要とされる推進コイルの起磁力は表 2 に記載した空気抵抗力で定められる。一方、推進コイルのターン数はその誘導起電力が電池モジュールの出力電圧を越えないように定めなければならない。その結果として推進コイルの電流値が高すぎると、500 km/h に達する前に電池を使い果たす可能性がある。そこで、磁気浮上走行のシミュレーションを行い、500 km/h の走行が可能かどうかを確かめる。

走行のシミュレーションは以下の仮定の下で行う。

- 1) 高速道路の状況を踏まえ、磁気浮上走行は車輪走行で 125 km/h まで加速した時点からスタートする。
- 2) 案内方向のシフトは 0 とし、走行時の案内コイルの寄与を全て無視する。
- 3) 電池の出力電圧は、放電深度に依存せず、一定とする。

図 10 推進・案内・浮上コイルの配置

Fig. 10. Configuration of propulsion, guidance and levitation coils.

図 11 磁気浮上式自動車の概念図

Fig. 11. Conceptual scheme of automobile with magnetic levitation.

表 2 自動車の設計仕様

Table 2. Design spec. of the automobile.

Dimensions	length	4.35 m
	width	1.8 m
	height	0.9 m
Weight	CFRP bedplate	440 kg
	battery modules	630 kg
	gross weight	1700 kg
Seating capacity		2
Batteries	type	Lithium-Ion
	amount of voltage	337.5 V
	amount of capacity	190 Ah
Max. speed	wheel	125 km/h
	magnetic levitation	500 km/h
Max. air resistance force		3704 N

図 12 自動車の速度対走行距離

Fig. 12. Speed vs. range of the automobile.

- 4) 電池の消費量はコイル電流の平均値（絶対値の平均）で見積もる。
- 5) 反発力および電磁力の計算において、インホイールモータやリフト用モータ等を使用される磁性体の影響は無視する。
- 6) 磁気浮上走行の電池消費量は 180 Ah とし、残りの 10 Ah は車輪走行で消費されたものとする。

最初にコイルの起磁力を求める。推進コイルの起磁力は 1 ピッチ走行距離における平均推進力 $\bar{F}_x$ が表 2 の空気抵抗を少し上回る値になるように定める。浮上コイルの起磁力は推進コイルに発生するピッチングトルクを打ち消す条

件の下で計算する。次に、コイルの電圧を、永久磁石ブロックの磁界に起因する鎖交磁束の変化、コイルの自己インダクタンス、コイル間の相互インダクタンス、およびコイルの抵抗を考慮して計算する。計算はコイルのターン数を変化させながら行い、コイル電圧のピーク値が電池モジュールの出力電圧を超えないようなターン数を見出す。最後に、1 ピッチ走行距離におけるコイル電流のパターンを確定し、その平均値に走行時間を掛けて電池の消費量を計算する。自動車の速度は

$$m \frac{dV}{dt} = \bar{F}_x - F_{air}(V) \dots \dots \dots (30)$$

の運動方程式を数値的に解いて求める。ここで、 m は車両の質量 (1700 kg) である。

図 12 は自動車の速度と走行距離の計算結果をグラフで表したものである。推進コイルのターン数は 6、浮上コイ

ルのターン数は 70 で設定した。この場合、推進コイル電圧のピークは 321 V、浮上コイル電圧のピークは 328 V であり、両者とも電池モジュールの出力電圧を下回る。加速時の平均推進力 $\bar{F}_x$ は 3719 N で与えた。減速は電池消費量が 180 Ah となった時点で開始し、125 km/h までの減速期間は $\bar{F}_x = 0$ 、すなわち、電池の消費量が無いものとして計算した。このグラフから、速度は 25 km まで上昇し、その後 40 km に至るまで 500 km/h の速度を維持していることがわかる。加速開始から減速終了までの走行距離は 52 km であった。

5. ま と め

磁気浮上式自動車の可能性を検討するため、永久磁石反発方式の磁気浮上輸送システムを提案した。このシステムでは、走行を車上 1 次方式のリニアシンクロナスマータで行わせるために、走行路を永久磁石ブロックのアレイ構造とし、浮上体を永久磁石プレート、推進コイル、案内コイル、浮上コイルで構成する。これらのコイルは同一平面上に配置され、永久磁石プレートと共に一体化して自動車の底板とする。その最大の特徴は走行路への進入と走行路からの離脱が自由であるという点である。永久磁石プレートと各コイルの寸法は電磁力の計算に基づいて定めた。この過程で、永久磁石ブロックのアレイ構造に起因する浮上力とピッチングトルクの脈動が消失する条件、および、安定化制御の対象となる案内系と受動的に安定な浮上系を分離する条件を明らかにした。また、自動車に搭載する直流電源として出力 337.5 V、容量 190 Ah のリチウムイオン電池を用いた場合の磁気浮上走行のシミュレーションを行った。加速は 125 km/h から開始し、125 km/h まで減速する間の電池消費量を 180 Ah とする条件で計算した所、車両重量 1700 kg、空気抵抗係数 0.2、車両面積 1.6 m² の自動車におい

て 500 km/h の走行が可能であることが判明した。ただし、現状では、加速開始から減速終了までの走行距離が 50 km 程度と短く、実用には程遠い。通常の自動車に匹敵する走行距離、たとえば 500 km、を実現するためには、直流電源の電流容量を 1 桁増すことが要求される。この点で、燃料電池の導入も視野に入れた更なる検討が必要であろう。

(平成 17 年 2 月 3 日受付, 平成 17 年 8 月 22 日再受付)

文 献

- (1) K. Kudo: "Outline of the MAGLEV transit 'LINIMO' (High Speed Surface Transport)", *J. IEE Japan*, Vol.124, No.8, pp.506-510 (2004-8) (in Japanese)
工藤健一:「実用線として開業を迎える磁気浮上式鉄道「リニモ」(HSST)の概要」, 電学論, **124**, 8, pp.506-510 (2004-8)
- (2) Transrapid International:
<http://www.transrapid.de/en/index.html>.
- (3) リニア中央新幹線:
<http://www.linear-chuo-exp-cpf.gr.jp/index.html>
- (4) (財) 日本自動車研究所: <http://www.jeva.or.jp/>
- (5) 加川幸雄: 電気・電子のための有限要素法の実践, オーム社 (1982)
- (6) Y. Kaneko: "Toward the Theoretical Value of Nd-Fe-B Sintered Magnets", *J. IEE Japan*, Vol.124, No.11, pp.695-698 (2004-11) (in Japanese)
金子祐治:「理論値を目指す Nd-Fe-B 焼結磁石」, 電学論, **124**, 11, pp.695-698 (2004-11)
- (7) 日本電池株式会社: <http://www.nippondenchi.co.jp/>
- (8) 近藤政市: 基礎自動車工学 前期編, 養賢堂 (1988)
- (9) 東京モーターショー: <http://www.tokyo-motorshow.com/>

森 山 伸 一 (正員) 1986 年九州大学大学院工学研究科博士後期課程終了。1988 年九州大学応用力学研究所助手。1991 年九州工業大学情報工学部助手, 核融合科学研究所共同研究員。現在に至る。トカマクプラズマの磁氣的診断, トカマク装置の運転制御, 磁気浮上式アクチュエータの研究開発等に従事。プラズマ・核融合学会, 計測自動制御学会, IEEE 各会員。