UDC 621.868: 621.318.2: 629.1.074: 531.3

論文

61-B116

永久磁石反発形磁気浮上方式の浮上力と横ずれ力の解析

正員 海老原 大 樹 (武蔵工大)

正員 今 川 和 彦 (武蔵工大)

正員 渡 部 満 (日 立)

1. ま え が き

近年、生産工場などにおける搬送システムは年々要求事項の高度化に対応すべく研究、開発がなされている。

搬送機構はトランスファーマシンとインテリジェンスマシンに代表されるが、全自動化工場を志向する場合、トランスファーマシンシステムの高度化が必要となる。

自動化搬送システムの要求として

(1) 構造が簡単であり、保守性の良いこと

(2) 搬送アクチュエータはサーボ性が高く、位置決め性能が高いこと

(3) 振動、騒音が少ないこと

(4) 発生するほこりが少ないこと

などがある。これらの条件を満足するアクチュエータとしては、リニアモータによる非接触駆動が注目されている。

一方、支持機構として従来はローラ、コンベア、車輪とレールなどが大半であるが、クリーンルーム内搬送の場合、要求クリーン度の高度化に伴いリニアモータと空気浮上支持方式の採用⁽¹⁾が増加してきた。また、更なる高度化に対して、超高速鉄道の研究で注目されている磁気浮上方式の採用も注目されている⁽²⁾。鉄道用として磁気浮上方式には、誘導反発式磁気浮上⁽³⁾と吸引浮上⁽⁴⁾が研究されているが、工場内搬送シ

ステムにおいては静止反発浮上方式が有効と考える。

すなわち、搬送システムに磁気浮上支持案内機構の採用とリニアモータを利用して非接触駆動が実施されれば、現在、話題となっているクリーンルーム内搬送でのクリーン度の確保が容易になるばかりでなく、工場内の労働環境改善として振動や騒音の排除、原子炉周辺搬送での軌道設備の無保守化の実現が考えられる。

ここに著者らは、磁気浮上方式で搬送システム用として利点が多いと考えられる永久磁石反発浮上方式に着目し研究を行った。なお、永久磁石反発浮上方式の特徴と用途に関し検討を加え、その内容を表1に示した。

永久磁石反発浮上の実用化はまだ存在していないが、これに関する研究は古くから提案があり、Polgreen 氏の輸送、搬送への応用に関する提案や Bohmanyer 氏らなどによる永久磁石間斥力の計算法の報告があった⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。しかし、実施に関する可能性を強く示唆する内容には至っていなかった。この原因は、浮上方式に利用する永久磁石が高保磁力を必要とするため、報告当時には条件を満足する永久磁石が存在しなかったことと、浮上案内に関する制御システムの確立が困難であったと考えられる。

表 1 永久磁石反発浮上方式の特徴と用途例

Table 1. The merit and uses of permanent magnet repulsion system.

用 途 例	永久磁石反発浮上方式の特徴			
	低振動低騒音	メンテナンスフリー	汚染防止	高精度位置決め
産業用精密機器	○	○	○	○
クリーンルーム内搬送	○	○	○	○
病院内搬送	○	○	○	○
原子炉内搬送	○	○	○	○

The Analysis of the Levitating and Lateral Force for the Magnetic Levitating System of the Permanent Magnet Repulsive Type. By Daiki Ebihara, Member, Kazuhiko Imagawa, Member (Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology) & Mitsuru Watabe, Member (Hitachi Ltd.).

海老原大樹: 正員, 武蔵工業大学工学部電気電子工学科

今川 和彦: 正員, 武蔵工業大学工学部電気電子工学科

渡部 満: 正員, (株)日立製作所

しかし近年、希土類コバルト磁石（例えば、サマリウムコバルト磁石）の開発と普及により永久磁石に関する問題は解決されたが、コストの面で問題は残る。

著者らはまず永久磁石反発浮上に関し、浮上力、横ずれ力の解析方法を検討し、基礎実験によりこの妥当性を得た。次に浮上モデル試験機を製作し、案内制御⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を行い浮上に成功した。

本論文では、まず永久磁石の斥力計算法による浮上力、横ずれ特性に関する解析手法を述べる。次に三種類の試験装置による計測値と計算値の比較を行う。

2. 永久磁石斥力の解析

永久磁石を利用した反発浮上方式において、永久磁石間に働く斥力計算が必要であり、そのベクトル成分である浮上力、横ずれ力の評価が本浮上システムの設計に際し重要な事柄である。

永久磁石間に働く力の定量化には、一般に有限要素法や差分法による数値解析があるが、膨大なデータ処理を必要としかつ計算費用も高価である。

著者らはより実用的な計算法として、Tsui 氏の提案⁽⁶⁾による永久磁石の磁気モーメントを等価側面電流ループに置換する手法につき検討した。この際、永久磁石の磁化分布が一樣であれば、式の簡易化が容易となる。そこで著者らは、この要求を満たしていると考えられるサマリウムコバルト磁石の利用について、基礎的な解析および実験を行い、その妥当性を得た。この基礎解析法につき述べる。

〈2・1〉 解析モデル 永久磁石間に働く斥力計算に際し、その解析モデルを図1に示す。

図1 永久磁石間の斥力解析モデル

Fig. 1. Model of a permanent magnet repulsion analysis.

図2 永久磁石等価面電流によるP点の磁束密度
Fig. 2. Flux density of P point by surface current of permanent magnet.

解析の概要は、まず同図のように両永久磁石を等価側面電流に変換し、図2に示すように片側（例えば、永久磁石2）の面電流 K_2 による任意の位置（例えば、P点）での磁束密度をビオ・サバールの法則により求める。P点を相対する永久磁石1の面電流の (A_1, B_1, C_1, D_1) の位置とし、供給された磁束密度 $d\mathbf{B}$ と面電流 K_1 より作用力を求め、両永久磁石全体につき合成し斥力を得る。この内容につき以降に詳しく説明を行う。

〈2・2〉 永久磁石間の斥力解析

(1) 二つの永久磁石相互間の解析 永久磁石の磁束密度と磁石間の斥力を定量化する方法として、まず永久磁石の磁化 $\mathbf{J}$ (T) を、体積電流密度 $\mathbf{I}$ (A/m²) と表面電流密度 $\mathbf{K}$ (A/m) で表わす。各電流密度は

$$\mathbf{I} = \nabla \times (\mathbf{J}/\mu_0) \quad (\text{A/m}^2) \quad (1)$$

$$\mathbf{K} = -m \times (\mathbf{J}/\mu_0) \quad (\text{A/m}) \quad (2)$$

ここで、 μ_0 : 真空透磁率で $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

(H/m), m : 磁石の表面に垂直な単位ベクトル

となる。

浮上系に用いる磁石は高保磁力であるので、磁石内全般で一様に磁化されていると考えられる。永久磁石は直方体であるため体積電流密度 $\mathbf{I}$ は零となり、面電流は非磁極面上 (A, B, C, D) を一巡し、その値は

$$K = J/\mu_0 \quad (\text{A/m}) \quad (3)$$

ここで、 $J = |\mathbf{J}|$

となる。

図2は永久磁石単体の解析モデルである。同図において、永久磁石の座標原点を永久磁石2の表面中心である $X = a_2/2$, $Y = b_2/2$, $z = 0$ に設定すると各非磁極面の座標は以下となる。

$$A_2 \text{ 面 } (X' = a_2/2, -b_2/2 \leq Y' \leq b_2/2,$$

$$\begin{aligned}
 & -C_2 \leq Z' \leq 0) \\
 B_2 \text{ 面 } & (-a_2/2 \leq X' \leq a_2/2, Y' = b_2/2, \\
 & -C_2 \leq Z' \leq 0) \\
 C_2 \text{ 面 } & (X' = -a_2/2, -b_2/2 \leq Y' \leq b_2/2, \\
 & -C_2 \leq Z' \leq 0) \\
 D_2 \text{ 面 } & (-a_2/2 \leq X' \leq a_2/2, Y' = -b_2/2, \\
 & -C_2 \leq Z' \leq 0)
 \end{aligned}$$

従って、図2における P' 点の座標は B_2 面に存在するため、 B_2 面座標と同一となる。

図1に示した永久磁石1は表面中心が永久磁石2の中心より $(-x, -y)$ だけ変化している。従って、永久磁石1の各非磁極面の座標は以下となる。

$$\begin{aligned}
 A_1 \text{ 面 } & (X = a_2/2 - x, -b_1/2 - y \leq b_1/2 - y, \\
 & h \leq Z \leq h + C_1) \\
 B_1 \text{ 面 } & (-a_1/2 - x \leq X \leq a_1/2 - x, \\
 & Y = b_1/2 - y, n \leq Z \leq n + C_1) \\
 C_1 \text{ 面 } & (X = -a_1/2 - x, -b_1/2 - y \leq Y \leq b_1/2 - y, \\
 & h \leq Z \leq h + C_1) \\
 D_1 \text{ 面 } & (-a_1/2 - x \leq X \leq a_1/2 - x, \\
 & Y = -b_1/2 - y, h \leq Z \leq h + C_1)
 \end{aligned}$$

ゆえに、図1に示した P 点の座標は B_1 面と同一に表示できる。永久磁石2から離れた P 点 (X, Y, Z) における磁束密度 $\mathbf{B}$ (T) は、ビオ・サバールの法則に

$$B_x = -\frac{J}{4\pi} \left[\left[\log \{R' + (Y - Y')\} \right]_{Z'=-C_2}^{Z'=0} \right]_{Y'=-b_2/2}^{Y'=b_2/2} \Big|_{X'=-a_2/2}^{X'=a_2/2} \quad (7)$$

$$B_y = -\frac{J}{4\pi} \left[\left[\log \{R' + (X - X')\} \right]_{Z'=-C_2}^{Z'=0} \right]_{Y'=-b_2/2}^{Y'=b_2/2} \Big|_{X'=-a_2/2}^{X'=a_2/2} \quad (8)$$

$$B_z = -\frac{J}{4\pi} \left[\left[\tan^{-1} \frac{(Z - Z')R'}{(X - X')(Y - Y')} \right]_{Z'=-C_2}^{Z'=0} \right]_{Y'=-b_2/2}^{Y'=b_2/2} \Big|_{X'=-a_2/2}^{X'=a_2/2} \quad (9)$$

ただし、 $R' = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2 + (Z - Z')^2}$

これらの数式は磁石の寸法と磁化の強さ、更に点 P 座標 (X, Y, Z) の関数である。

斥力 $\mathbf{F}$ (N) は、磁石2の磁束密度と磁石1の面電流の間に働く電磁力 $d\mathbf{F}$ の積分として計算される。例えば、図1で磁石1の面 B_1 上の面電流 K_1 と磁石2による磁束密度 $\mathbf{B}_2$ の間に働く $d\mathbf{F}$ は

$$\begin{aligned}
 d\mathbf{F} &= (-K_1 \mathbf{i} \cdot dz_1) \times \mathbf{B}_2 \cdot dy_1 \\
 &= \frac{J_1}{\mu_0} (-\mathbf{i}) \times \mathbf{B}_1 \cdot dy_1 dz_1 \quad (10)
 \end{aligned}$$

となり、全体での力 $\mathbf{F}$ は、台車側電流面上における $d\mathbf{F}$ の和として計算できる。

$$\mathbf{F} = \frac{J}{\mu_0} \int_h^{h+C_1} \left\{ \int_{-b_1/2+y}^{b_1/2+y} \mathbf{i} \times \mathbf{B}_{2A} \cdot dy_1 \right.$$

よる $d\mathbf{B}$ (T) の積分として計算される。

例えば、図2に示されている電流面 B_2 の P' 点より $\mathbf{r}$ 離れた位置における P 点の磁束密度 $d\mathbf{B}$ は、

$$\begin{aligned}
 d\mathbf{B} &= \mu_0 \frac{(-\mathbf{i} K \cdot dZ') \times \mathbf{r}}{4\pi r^3} \cdot dX' \\
 &= J \frac{-\mathbf{i} \times \mathbf{r}}{4\pi r^3} \cdot dX' dZ' \quad (4)
 \end{aligned}$$

となる。

ここで、 $\mathbf{r}$ は点 P' から点 P への位置ベクトルであり、 $r = |\mathbf{r}|$ 、 $\mathbf{i}$ は X 軸の単位ベクトルである。 P 点における磁束密度 $\mathbf{B}$ は、軌道側電流面からの合成であり、

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B} &= \frac{J}{4\pi} \int_{-C}^0 \left\{ \int_{-b_1/2}^{b_1/2} \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{r}_A}{r_A^3} dy' \right. \\
 &\quad + \int_{-a_1/2}^{a_1/2} \frac{-\mathbf{i} \times \mathbf{r}_B}{r_B^3} dx' + \int_{-b_1/2}^{b_1/2} \frac{-\mathbf{j} \times \mathbf{r}_C}{r_C^3} dy' \\
 &\quad \left. + \int_{-a_1/2}^{a_1/2} \frac{\mathbf{i} \times \mathbf{r}_D}{r_D^3} dx' \right\} dz' \quad (5)
 \end{aligned}$$

となる。

ここで、 $\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \mathbf{r}_C, \mathbf{r}_D$ は各電流面点 P' より点 P までの位置ベクトルであり、 $r_A = |\mathbf{r}_A|$, $r_B = |\mathbf{r}_B|$, $r_C = |\mathbf{r}_C|$, $r_D = |\mathbf{r}_D|$, $\mathbf{j}$ は Y 軸の単位ベクトルである。

この結果、(5)式の磁束密度は次式のように整理できる。

$$\mathbf{B} = [B_x, B_y, B_z] \quad (6)$$

ここで、 B_x, B_y, B_z は以下となる。

$$\begin{aligned}
 & + \int_{-a_1/2+x}^{a_1/2+x} (-\mathbf{j}) \times \mathbf{B}_{2B} \cdot dx_1 \\
 & + \int_{-b_1/2+y}^{b_1/2+y} (-\mathbf{i}) \times \mathbf{B}_{2C} \cdot dy_1 \\
 & + \int_{-a_1/2+x}^{a_1/2+x} \mathbf{j} \times \mathbf{B}_{2D} \cdot dx_1 \Big\} dz \quad (11)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{B}_{2A}, \mathbf{B}_{2B}, \mathbf{B}_{2C}, \mathbf{B}_{2D}$ は台車側電流面上の磁束密度のベクトルである。

この結果、全体の斥力 $\mathbf{F}$ は、

$$\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z] \quad (12)$$

で表わせる。

ここで、 F_x, F_y, F_z は以下となる。

$$F_x = \frac{J_1 J_2}{4\pi\mu_0} \left[\left(\int_h^{h+c_1} \left[(y_1 - y_2) \tan^{-1} \right. \right. \right. \\ \times \frac{(z_1 - z_2)R}{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)} - (z_1 - z_2) \log \{R \\ \left. \left. \left. + (y_1 - y_2) \right\} \right] dz_1 \right] z_2 \right] y_1 \right] y_2 \right] x_1 \right] x_2 \quad (13)$$

$$F_y = \frac{J_1 J_2}{4\pi\mu_0} \left[\left(\int_h^{h+c_1} \left[(x_1 - x_2) \tan^{-1} \right. \right. \right. \\ \times \frac{(z_1 - z_2)R}{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)} - (z_1 - z_2) \log \{R \\ \left. \left. \left. + (y_1 - y_2) \right\} \right] dz_1 \right] z_2 \right] y_1 \right] y_2 \right] x_1 \right] x_2 \quad (14)$$

$$F_z = \frac{J_1 J_2}{4\pi\mu_0} \left[\left(\int_h^{h+c_1} \left[2R - (y_1 - y_2) \log \{R \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + (x_1 - x_2) \right\} - (x_1 - x_2) \log \{R \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + (y_1 - y_2) \right\} \right] dz_1 \right] z_2 \right] y_1 \right] y_2 \right] x_1 \right] x_2 \quad (15)$$

ただし、 $R = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$ とする。

なお、永久磁石の寸法より

$$\begin{aligned} -b_1/2 - x &\leq x_1 \leq a_1/2 - x, \\ -a_2/2 &\leq x_2 \leq a_2/2, \\ -b_1/2 - y &\leq y_1 \leq b_1/2 - y, \\ -b_2/2 &\leq y_2 \leq b_2/2, \\ -c_2 &\leq z_2 \leq 0 \end{aligned}$$

である。

これらの数式は磁石の寸法と磁化の強さ、そして磁石の配置 (x, y, h) の関数で表現されている。

(2) 長い永久磁石と短い永久磁石間の斥力解析

前項の解析は単に永久磁石単体同士の斥力計算であった。搬送システム用として利用を考えた場合、永久磁石の寸法は台車側と軌道側と異なる。長い永久磁石を軌道側とするならば、図3になるようなモデル図における斥力計算を行わなければならない。

すなわち前項での計算と異なることは、図1での a_2 が大変に長いため無限長と仮定できる。この仮定により、軌道側磁石の電流面のうち面 A_2 と面 C_2 の影響を無視できることから、前項の解析において変位 x の項が無視できる。従って、モデルにおいては図1の $d\mathbf{B}$ を $d\mathbf{B}_2$ と表現すると、

$$d\mathbf{B}_2 = \mu_0 \frac{(-K_2 \mathbf{i} \cdot d\mathbf{z}_2) \times \mathbf{r}''}{2\pi r''^2}$$

図3 軌道用永久磁石と台車用永久磁石との解析モデル

Fig. 3. Model of analysis for permanent magnets between rails and pallet.

$$= \frac{J_a}{2\pi} \frac{(-\mathbf{i}) \times \mathbf{r}''}{r''^2} \cdot d\mathbf{z}_2 \quad (16)$$

となる。

従って、磁束密度 $\mathbf{B}_a''$ は次式となる。

$$\mathbf{B}_a'' = \frac{J_a}{2\pi} \int_{-c_2}^0 \left(\frac{-\mathbf{i} \times \mathbf{r}_B''}{r_B''^2} + \frac{\mathbf{i} \times \mathbf{r}_D''}{r_D''^2} \right) dz_2 \quad (17)$$

となる。

ここで $\mathbf{r}_B''$, $\mathbf{r}_D''$ は、面 B_1 , D_1 上より点 P までの Y - Z 平面上の位置ベクトルである。

$$r_B'' = |\mathbf{r}_B''|, \quad r_D'' = |\mathbf{r}_D''|$$

この結果、合成された P 点の磁束密度 $\mathbf{B}_2''$ は

$$\mathbf{B}_2'' = [B_{2x}'', B_{2y}'', B_{2z}''] \quad (18)$$

となる。

ここで、 $B_{2x}'', B_{2y}'', B_{2z}''$ は以下の式で表現される。

$$B_{2x}'' = 0 \quad (19)$$

$$B_{2y}'' = \frac{J_a}{4\pi} \left[\log \{ (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 \} \right]_{Y_1 = -b_1/2}^{Y_1 = b_1/2} \int_{Z_2 = -c_2}^{Z_2 = 0} \dots \quad (20)$$

$$B_{2z}'' = \frac{J_a}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{Z - Z_2}{Y - Y_2} \right]_{Y_1 = -b_1/2}^{Y_1 = b_1/2} \int_{Z_2 = -c_2}^{Z_2 = 0} \dots \quad (21)$$

また、浮上力 $\mathbf{F}''$ は

$$\mathbf{F}'' = [F_x'', F_y'', F_z''] \quad (22)$$

となる。

ここで、 F_x'', F_y'', F_z'' は以下の式とする。

$$F_x'' = 0 \quad (23)$$

$$F_Y'' = \frac{J_1 J_2}{4\pi\mu_0} a_1 \left\{ \left[\left[\left[\left[2(Z_1 - Z_2)T - (Y_1 - Y_2)L \right]_{Y_2=b_2/2}^{Y_2=b_1/2} \right]_{Y_1=b_1/2+y}^{Y_1=b_1/2-y} \right]_{Z_2=0}^{Z_2=h} \right]_{Z_1=h+c_1}^{Z_1=h} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

$$F_Z'' = \frac{J_1 J_2}{4\pi\mu_0} a_1 \left\{ \left[\left[\left[\left[(Z_1 - Z_2)L + 2(Y_1 - Y_2)T \right]_{Y_2=b_2/2}^{Y_2=b_1/2} \right]_{Y_1=b_1/2+y}^{Y_1=b_1/2-y} \right]_{Z_2=0}^{Z_2=h} \right]_{Z_1=h+c_1}^{Z_1=h} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

ただし,

$$T = \tan^{-1} \frac{Z_1 - Z_2}{Y_1 - Y_2},$$

$$L = \log \{ (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2 \}$$

である。

これらの数式は前項の数式(13)~(15)式よりも単純であり、浮上力は電卓程度で計算することができる。

(3) 永久磁石の支持材料に強磁性材が使用される
ときの斥力解析 実際の搬送システムに利用する支持機構には、強度上構造材として鉄などの強磁性材を使用することが大変に多い。

永久磁石反発浮上方式においてもこの例外ではない。ここに永久磁石の斥力計算には永久磁石自体の支持材として、鉄材が存在する状況での解析が必要となる。通常、永久磁石と強磁性材料との結合は解析を複雑にしている。

著者らはこの対応手段として電気映像法の応用を試みた。この手法の条件として十分に厚い鉄材を利用することが必要であるが、実験においては25mm厚の軟鉄材を用いたため、問題がないと考える。

図4にこの解析モデルを示す。同図には多くの影像磁石が二枚の鉄材のために存在する。各影像磁石効果は実際には鉄材からの距離に反比例して減少する。正確にはより遠くの影像磁石も考慮する必要があるが、

図4 影像磁石による解析モデル

Fig. 4. Model of imaginary magnet analysis.

鉄材に最も近い影像磁石、例えば、1.1.aや2.1.aのみを考慮し計算を行った。このことは磁石の厚みが二倍になったことに相当する。従って磁束密度、浮上力の計算は(18)式、(22)式に対し、永久磁石の厚さの項 c_1 , c_2 を二倍として計算を行う。

3. 浮上力、横ずれ力の評価のための実験

〈3.1〉 基礎実験装置 前節で述べた解析の妥当性を判断するために三種類の基礎実験を行った。すなわち、前節(1),(2),(3)の各項に該当するモデルを試作し、解析の中間チェックとしての磁束密度分布の計測と浮上力、横ずれ力の計測を行った。三種類の装置の諸元を表2と表3に示す。

(1) 試作機1での実験装置 前節(1)項で解析した永久磁石単体同士における実験である。その装置の諸元を表2に示し、概要図を図5に示す。

表2 基礎実験装置諸元(試作機1)

Table 2. Dimension of fundamental experiment.

永久磁石取付場所		台車側	軌道側
保持力 iH_c (kA/m)		394	
磁化 J (T)		0.522	0.466
寸法 (mm)	a	50	50
	b	20	20
	c	5	5
対向磁石対数		1	

表3 軌道用永久磁石と台車用永久磁石の試作機モデル諸元(試作機2,3)

Table 3. Dimensions of permanent magnets repulsion devices.

実験モデル	試作機2(I)		試作機3(II)	
Sm-Co 永久磁石	台車側	軌道側	台車側	軌道側
保持力 iH_c (kA/m)	639		597	
磁化の強さ J (T)	0.778	0.819	0.719	0.726
寸法 (mm)	a	520	3,640	500
	b	4	4	19
	c	3	3	20
軌道の数(本)	2		2	
軌道間距離(mm)	24		300	
支持材	平板状アルミニウム材	平板状鉄材	平板状鉄材	平板状鉄材

図 5 基礎実験装置

Fig. 5. Fundamental experiment device.

図 6 浮上力、横ずれ力の計測モデル図

Fig. 6. Measurement system of repulsion and lateral force.

試作機 1 は永久磁石の反発による台車側磁石の反転を防止するためのスライドを設け、台車の荷重を変化させ浮上力と浮上高を計測し、更に磁束密度分布も計測した。

(2) 試作機 2 での実験装置 二本の長い軌道側磁石と短い二本の台車側磁石を有する試作機である。その諸量を表 3 (I) に示す。軌道側磁石は鉄材により固定されているが、台車側磁石はアルミニウムにより固定されている。この装置については浮上力の計測と磁束密度の計測を行い、解析の妥当性をチェックした。

なお浮上力計測は、図 6 に示すようにストレインメータを利用して行った。

(3) 試作機 3 での実験装置 試作機 3 の諸量は表 3 (II) に示すように、軌道側永久磁石、台車側永久磁石ともに鉄材で固定した実際の永久磁石浮上装置に近い試作機である。

この実験では、解析の中間チェックとしての磁束密度分布計測はもとより、浮上力、横ずれ力の計測と図 6 の計測システムにより行った。

〈3・2〉 解析値と実測結果の比較

(1) 試作機 1 における実験結果 前節で述べた試作機 1 の軌道上距離に対する磁束分布密度と浮上高さに対する浮上力特性を、それぞれの解析結果と比較

図 7 試作機 1 の磁束密度分布

Fig. 7. Magnetic flux density on the surface of the test device 1.

図 8 試作機 1 の浮上力特性

Fig. 8. The characteristic of repulsion force by test device 1.

して図 7 と図 8 に示す。

図 7 は台車側磁石 (PM 1) をはずした状態で、軌道側磁石 (PM 2) の上方における磁束密度分布である。計測位置は永久磁石表面上 1 mm の高さで、Y 方向は磁石幅中央とし軌道上距離 x に対する分布であるが、以降この計測位置の表示を $(x, 0, 1)$ とする。これより計測値と計算結果は、ほぼ一致している。

図 8 に浮上高さと浮上力の関係を示す。同図より簡易な本解析手法の妥当性が得られたと判断できる。

(2) 試作機 2 における実験結果 図 9 は試作機 2 における軌道側磁石の上方の磁束密度分布を示す。計測位置は試作機 1 と同じく $(x, 0, 1)$ である。

図 10 に試作機 2 での浮上高さに対する浮上力の特性を示す。これより鉄材を考慮した解析手法として、電気映像法の応用が有効であることが判断できる。磁束密度、浮上特性とも実測値とよりよい一致がみられ、解析手法に問題はないと考えられる。

図 9 試作機 2 の軌道側磁石による磁束密度分布
Fig. 9. Flux density distribution of rail side permanent magnet by test device 2.

図 12 試作機 3 の台車側磁石による
磁束密度分布

Fig. 12. Flux density distribution of pallet side permanent magnet by test device 3.

図 10 試作機 2 の浮上力特性
Fig. 10. The characteristic of repulsion force by test device 2.

図 13 横ずれ変位に対する横ずれ力 F_y 特性
Fig. 13. Characteristics of lateral force F_y versus side displacement.

(3) 試作機 3 における実験結果 試作機 3 は搬送用浮上システムとして、より現実的な装置である。後述するが著者らが最終的に浮上システムとして選択した永久磁石は、試作機 3 の寸法とほとんど同様である。

図 11 に台車側磁石を取り外し、軌道側磁石単独状態における磁石表面上方の磁束密度分布を示す。計測位置は $(x, 0, 1)$ である。

図 12 は台車側磁石のみの磁束密度分布を示す。試作機 1, 2 と同様にほぼ解析結果と一致した計測値を得た。なお図 13 には軌道側磁石に対し、台車側磁石を Y 方向に変位させたときの横ずれ力 F_y 特性を示す。浮上高をパラメータとしたが、実測値と計測結果はよりよい一致がみられ、解析の妥当性を裏付けている。

以上の計算値と計測値の比較から簡易な解析方法ではあるが、永久磁石反発浮上系の浮上力、横ずれ力の算定が行えることが判断できた。

図 11 試作機 3 の軌道側磁石による
磁束密度分布
Fig. 11. Flux density distribution of rail side permanent magnet by test device 3.

5. む す び

著者らは今後の搬送システムに対し、クリーンルームなどにおいて磁気浮上方式の採用が必要であると判断し、この観点から永久磁石反発浮上方式の提案を行った。

まず著者らは永久磁石反発浮上方式の設計に必要な永久磁石間の斥力解析に関し、永久磁石寸法と磁化より特性値が得られる簡易計算法を述べた。

次に本計算法の妥当性の評価のため三種類の試験装置を試作し、測定した結果、計算値と解析法はより良い一致がみられた。これらの実験は搬送システムとしての利用を考慮した荷重であり、浮上力は十分満足のいく値であった。本論文では述べなかったが、著者らは既に案内制御に対して実験を行い、停止状態での浮上制御に成功している。紙面の都合上、別の機会に報告する所存である。

以上の研究により、搬送システム用磁気浮上方式として永久磁石反発浮上方式の採用の可能性は高いと判断できる。

なお、本研究に対し熱心な討論をいただいた電気学会、リニア電磁アクチュエータ調査専門委員会（委員長、信州大学工学部 山田 一教授）および東京大学

工学部 正田英介教授に対し心よりお礼を述べる次第である。

（昭和60年9月24日受付、同61年7月22日再受付）

文 献

- (1) 福渡：「クリーンルーム用リニアモータ応用自動搬送システム」，産業機械，p. 50（昭59）
- (2) 例えば，日経産業新聞：磁気浮上搬送システム開発（東芝），昭和60年2月13日号
- (3) 佐々木：「超電導誘導反発方式」，電学誌，102，27（昭57-10）
- (4) K. Fujisaki, E. Masada & M. Tamura: "Dynamic Behaviour of Traction-Suspension Model for the Magnetically-Levitated Vehicle", Proc. ICEM '84, Part 2, p. 501 (1984)
- (5) G.R. Polgreen: New Application of Modern Magnets, (1966) Macdonald Press, London
- (6) B.Y. Tsui: "The Effect of Intrinsic Magnetic Properties on Permanent Magnet Repulsion", IEEE Trans. Magnetics, MAG-8, 2 (1972)
- (7) R.H. Borcherts: "Mathematical Analysis of Permanent Magnet Suspension System", J. Appl. Phys., 42, 4 (1971)
- (8) H. Bahmanyar, et al.: "The Application of Permanent Magnets to Suspension of Surface guide Vehicles", IEEE, Conf. Pub., p. 120 (1974)
- (9) M. Watabe, D. Ebihara, et al.: "A Simple Calculation of Levitation Force using Rear Earth Magnets on Repulsion Mode" IEEJ. Tech. Meetings on Magnetics, MAG-82-86 (1982)
- (10) 海老原・片木・渡部：「永久磁石反発浮上系の案内制御」，電気学会マグネティックス研資，MAG-84-25，（昭59）