浮上式鉄道における強磁界しゃへい

正 員 大 熊 繁 (名古屋大)
 非会員 杉 山 久 佳 (名古屋大)
 正 員 雨 宮 好 文 (名古屋大)

1. ま え が き

我が国においては、国鉄が牽引力となって超電導電磁石を用いた浮上式鉄道の開発を進めている。

このシステムにおいては、車両には推進案内用車上コイルと支持用車上コイルが積載され、それらは数百 kAT の起磁力をもつ超電導コイルである。超電導コイルの作る高磁界が乗客のもつ電子機器、時計、ペースメーカ、更に乗客の人体そのものに与える影響については不明の点が多いが、事前に強磁界のシールド方法を検討しておくことは意味のあることであると考え

る。鉄道技術研究所では、実験車 ML-100 を用いて直流磁界の実測を行ない、支持用車上コイルが起磁力 260 kAT のとき床面において最高 390 G (約 0.04 テスラ、以下 T とする) を測定した⁽¹⁾。磁界の強さは磁束密度で表わすことにする。この値はのちに示す目標値 0.005 T に比べると著しく大であり、磁気シールドが必要であることがわかる。鉄道技術研究所では強磁性材料を用いた磁気シールド (パッシブシールディング) を考え、一般鋼材および各種磁性材料の組合せによる磁気シールドを検討した⁽²⁾。

これに対して、Iwasa 氏⁽³⁾は超電導線を用いた磁気シールド (アクティブシールディング) の検討結果を発表した。まず磁束密度の目標値として Aceto, Jr. 氏ら⁽⁴⁾の検討結果による 0.005 T をとった。Iwasa 氏は、客室の床面で磁束密度 0.03 T であるものを、アクティブシールディングの場合には 1/3 倍余分の超電導線を用いるだけで目標値 0.005 T 以下にできること、更にパッシブシールディングの場合には同じ効果

を得るために 2 cm 厚の鉄板を敷く必要があり、100 人用客車で少なくとも 10 t の重量増となり実用的ではないことを示した。Iwasa 氏の検討は円形の支持用車上コイル 1 個を円形のシールドコイル 1 個で磁気シールドする場合を考えた極めて簡単なモデルで行なわれた。

筆者らは宮崎実験線の実車モデルを用い、支持用車上コイルのみならず、客室に近く起磁力も大である推進案内用車上コイルをも含む超電導コイル系に対してシールド問題を検討した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

その結果、磁気シールドがない場合には磁束密度の最大値は 0.02~0.03 T であり、目標値 0.005 T 以下となる領域はほとんどないこと、アクティブシールディングを行なう場合にはシールドコイルを網目状に配置 (支持用車上コイルと推進案内用車上コイルの極性を適当に選ぶ) すれば、全領域の 2/3 の領域を目標値以下に引き下げることができ、残りの 1/3 の領域での最大磁束密度は 0.01 T 以下であり、床敷きに厚さ 4.8 mm の鉄板を用いれば (パッシブシールディング) 全領域で磁束密度を目標値以下にできること、などの結論を得た。

2. 計 算 方 法

浮上式鉄道の軌道方式には、逆 T 字形と U 字形がある。この章では逆 T 字形を例にとって議論を進める。

宮崎実験線において、逆 T 字形軌道の場合の実車モデルを第 1 図に示す。超電導コイルとして支持用 (車上) コイルと推進案内用 (車上) コイルがあり、それらは進行方向に無限に多く並んでいる (磁界の極性は交番) ものとする。超電導コイルは定磁束モードであり、シールドコイルの鎖交磁束は零とする。

(2・1) シールドコイルのない場合 第 1 図の各コイルの各辺は第 2 図の u, v, w に適当な値を与えた導線 AB, CD, EF の組合せである。導線 AB, CD, EF に電流 I が流れているときを考える。任意の点 P の座標を (x, y, z) とするとき、 P 点での磁界 $H_1(=$

Magnetic Shielding for Magnetically Levitated Trains. By Shigeru Okuma, Member, Hisayoshi Sugiyama, Non member, & Yoshifumi Amemiya, Member (Dep. of Electrical Eng., Faculty of Engineering, Nagoya University).

大熊 繁: 正員, 名古屋大学工学部電気学科

杉山久佳: 名古屋大学工学部電気学科

雨宮好文: 正員, 名古屋大学工学部電気学科

第 1 図 実車モデル

Fig. 1. Coil configuration.

第 2 図 コイル辺による磁界

Fig. 2. Magnetic fields of a wire.

(H_{1x}, H_{1y}, H_{1z}) , $H_2=(H_{2x}, H_{2y}, H_{2z})$, $H_3=(H_{3x}, H_{3y}, H_{3z})$ はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} H_{1x} &= -\frac{y-v}{\sqrt{(x-u)^2+(y-v)^2}} H_1 \\ H_{1y} &= \frac{x-u}{\sqrt{(x-u)^2+(y-v)^2}} H_1 \\ H_{1z} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{2x} &= 0 \\ H_{2y} &= -\frac{z-w}{\sqrt{(y-v)^2+(z-w)^2}} H_2 \\ H_{2z} &= \frac{y-v}{\sqrt{(y-v)^2+(z-w)^2}} H_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{3x} &= \frac{z-w}{\sqrt{(x-u)^2+(z-w)^2}} H_3 \\ H_{3y} &= 0 \\ H_{3z} &= -\frac{x-u}{\sqrt{(x-u)^2+(z-w)^2}} H_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

となる。ここで、 H_1, H_2, H_3 は

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{I}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{(x-u)^2+(y-v)^2}} \\ &\times \left\{ \frac{z+a}{\sqrt{(x-u)^2+(y-v)^2+(z+a)^2}} - \frac{z-a}{\sqrt{(x-u)^2+(y-v)^2+(z-a)^2}} \right\} \\ &\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$H_2 = \frac{I}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{(y-v)^2+(z-w)^2}}$$

$$\times \left\{ \frac{x-u+b}{\sqrt{(x-u+b)^2+(y-v)^2+(z-w)^2}} - \frac{x-u-b}{\sqrt{(x-u-b)^2+(y-v)^2+(z-w)^2}} \right\} \dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} H_3 &= \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{(x-u)^2+(z-w)^2}} \\ &\times \left\{ \frac{y-v+c}{\sqrt{(x-u)^2+(y-v+c)^2+(z-w)^2}} - \frac{y-v-c}{\sqrt{(x-u)^2+(y-v-c)^2+(z-w)^2}} \right\} \\ &\dots\dots (6) \end{aligned}$$

である。(1)~(6)式を用いてすべての辺の作る磁界を計算し極性を考慮して加えれば、任意の点 P における磁界 H が求まる。

〈2・2〉 1 対の車上コイルに対し 1 個のシールドコイルがある場合 第 1 図において、対向して置かれている二つの推進案内用コイルと二つの支持用コイルとを合わせて 1 対の車上コイルとする。1 対の車上コイルに対してシールド問題を考える。車上コイルは極性を交番して励磁されており、多数の車上コイルのシールド問題は 1 対の車上コイルの問題に帰着する。最初に 1 番簡単なシールド構造である 1 対の車上コイルにつき、1 個のシールドコイルを設ける場合を考えよう。その例を第 3 図に示す。シールドコイルを流れる電流 i を求める。シールドコイル S_0 の鎖交磁束 Φ は

$$\begin{aligned} \Phi(i, I_1, I_2) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} L_n i + \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_{1n} I_1 \\ &\quad + \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_{2n} I_2 \dots\dots (7) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $L_n (n \neq 0)$ はコイル S_n と S_0 との相互インダクタンス、 L_0 はコイル S_0 の自己インダクタンス、 M_{1n} はコイル S_0 と推進案内用コイル A_n, A_n' との相互インダクタンス、 M_{2n} はコイル S_0 と支持用コイル B_n, B_n' との相互インダクタンスである。 i はシールドコイル電流であり、 I_1, I_2 はそれぞれ推

第 3 図 シールドコイルの配置例

Fig. 3. Coil configuration of shielding coils.

進案内用コイル電流と支持用コイル電流である。シールドコイルの鎖交磁束が零であるという条件より $\Phi(i, I_1, I_2) = 0$ とすれば、シールドコイル電流 i は

$$i = - \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} M_{1n} I_1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_{2n} I_2}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} L_n} \dots\dots (8)$$

となる。これでシールドコイル電流が求まった。任意の点 P の磁界は〈2・1〉節の(1)～(6)式を用いれば求まる。

〈2・3〉 シールドコイルを分割する場合 シールドコイルの鎖交磁束は零であるのでシールドコイルを通過した磁束はシールドコイルの誘起電流による磁束によって打ち消される。1個のシールドコイルを分割して複数個とすれば、磁束はシールドコイルによってきめ細かくシールドされ、入ってきた磁束はシールドコイル近くで戻り再び出てゆくように見える。それゆえ客室床面においては、シールド効果は分割しない場合と比べて大になることが予想される。

進行方向である X 方向について、分割してもあまり効果がないことは磁力線の向きから明らかである。案内方向である Y 方向について分割したときのコイル配置を第4図に示す。推進案内用コイルが左右同極性の場合（同極と呼ぶ）と左右異極性の場合（異極と呼ぶ）とは、シールドコイルの配置は異なる。

シールドコイルが $S_{0,-m}$ から $S_{0,m}$ までである場合のシールドコイル電流を求める。シールドコイル $S_{0,i}$ (i は整数) に鎖交する磁束を Φ_i とするとき、連立方程式は x 軸に対して、半面だけを考えればよく

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= a_{11} i_1 + \dots + a_{1k} i_k + \dots + a_{1m} i_m \\ \vdots \\ \Phi_l &= a_{l1} i_1 + \dots + a_{lk} i_k + \dots + a_{lm} i_m \\ \vdots \\ \Phi_m &= a_{m1} i_1 + \dots + a_{mk} i_k + \dots + a_{mm} i_m \\ &+ b_{11} I_1 + b_{12} I_2 \\ &\vdots \\ &+ b_{l1} I_1 + b_{l2} I_2 \\ &\vdots \\ &+ b_{m1} I_1 + b_{m2} I_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

が成立する。ここで $a_{ik} (1 \leq k \leq m)$ はシールドコイル $S_{0,i}$ と電流 i_k の流れるすべてのシールドコイル $S_{n,k} (-\infty \leq n \leq \infty)$ との間のインダクタンス、 b_{11} はシールドコイル $S_{0,i}$ と推進案内用コイルとの相互インダクタンス、 b_{12} はシールドコイル $S_{0,i}$ と支持用コイルとの相互インダクタンスである。 I_1, I_2 は推進案内用コイルと支持用コイルの電流である。シールドコイルの鎖交磁束が零の条件より $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m = 0$ となり、電流 $i_1, i_2, \dots, i_m$ が求まる。磁界は〈2・1〉節によ

(a)同極性車上コイルの場合 (b)異極性車上コイルの場合

第4図 シールドコイルの分割

Fig. 4. Partition of a shielding coil.

り求まる。

〈2・4〉 シールドコイルを網目にする場合 第4図において隣接シールドコイル間の間隔 d_s を零とすると、シールドコイルは網目状になる。シールドコイル間の漏れがなくなり単に分割する場合に比べてシールド効果の改善が期待できる。この場合シールドコイル間の相互インダクタンスを求めるときに、コイルの太さを考慮する必要があることを付言しておこう。

以上、逆T字形軌道を例にとって、議論を進めてきた。U字形軌道の場合でも同様である。U字形軌道は逆T字形に比べて客室部を広くとることができ、営業用の車面に適しているといわれている。

3. 数値計算

第2章で示した計算方法に従って、実車モデルを用いて磁界計算を行なった。実車モデルの諸元の数値⁽⁷⁾を第1表に示す。但し、客室の長さを 25m、床の高さを $h=1$ m とした。

磁界は進行方向である X 方向について周期的であり、 x の範囲は $0 \leq x \leq p/2$ (p は車上コイルピッチ) を考える。 Y 方向については X 軸について対称であり、客室の存在範囲である $0 \leq y \leq 1.8$ m の範囲を考える。磁界の強さは磁束密度で表し、客室の床面での

第1表 諸元の記号と数値

Table 1. Dimensions of train model.

推進案内用車上コイル	幅	$2a=0.5$ m
	長さ	$2b=1.6$ m
	ピッチ	$p=2.1$ m
	起磁力	$I_1=450$ kAT
	左右車上コイル間隔	$2d_1=1.875$ m (逆T字形) $=2.625$ m (U字形)
支持用車上コイル	幅	$2c=0.3$ m
	長さ	$2b=1.6$ m
	ピッチ	$p=2.1$ m
	起磁力	$I_2=140$ kAT
	左右車上コイル間隔	$2d_2=2.25$ m
客室の床	長さ	25 m
	幅	$2d_3=3.6$ m
	高さ	$h=1.0$ m

第5図 励磁方式

Fig. 5. Alternative current excitations.

値を示す。

〈3・1〉 シールドコイルのない場合 推進案内用コイルと支持用コイルの励磁方法には4種類あり、それらを第5図に示す。(a)図は逆T字形とU字形のコイル配置を示す、(b)図は励磁方式を示す。図において、異極とは前述のように左右の推進案内用コイルが異極性であること、同極とは左右の推進案内用コイルが同極性であること、和動とは推進案内用コイルと支持用コイルとの磁界が和の向きであること、差動とは磁界が差の向きであることを意味する。

以下の第6図から第12図において、コイルの位置は XY 面上での位置を示しており、進行方向である X 方向については、 $x=0, 0.5, 1.0\text{m}$ の位置を実線で示しそれらの位置での磁束密度を代表として示す。

逆T字形軌道で異極と同極の場合の磁束密度分布を第6図(a), (b)に示す。(a)図において異極の場合には、支持用コイルが和動のとき最大値は $3.3 \times 10^{-2}\text{T}$ であり、差動のときには最大値は $2.9 \times 10^{-2}\text{T}$ である。これらの値は目標値 0.005T に比べて6倍程度大であり、床面のうち、目標値以下の領域はほとんどない。それゆえ磁気シールドを必要とする。支持用コイルのない場合に比べ、和動のときも差動のときも差は小さく、支持用コイルの影響はわずかである。

次に同極の場合を見てみよう。第6図(b)より和動のときは最大値 $2.1 \times 10^{-2}\text{T}$ であり、差動のときには最大値 $2.8 \times 10^{-2}\text{T}$ である。この場合も目標値以下の領域はほとんどなく、磁気シールドを必要とする。第6図(a), (b)より、異極よりも同極の方が床面での磁束密度が小さいことがわかる。

U字形で異極と同極の場合を第7図(a), (b)に示す。最大値は和動異極のとき $2.6 \times 10^{-2}\text{T}$ 、差動異極のとき 3.0×10^{-2} 、和動同極のとき $2.6 \times 10^{-2}\text{T}$ 、ならびに差動同極のとき $2.6 \times 10^{-2}\text{T}$ である。第5図に示

第6図 シールドコイルがない場合の磁束密度分布(逆T字形)

Fig. 6. Magnetic fields without shielding coils.

第7図 シールドコイルがない場合の磁束密度分布(U字形)

Fig. 7. Magnetic fields without shielding coils.

したように、U字形の場合には推進案内用コイル間の距離は逆T字形に比べて大となり、異極と同極のときの最大値の差は小さい。この場合も目標値 0.005T 以下の領域はわずかであり磁気シールドを必要とする。支持用コイルの寄与は小さいので、U字形における磁束分布は逆T字形で推進案内用コイル間隔が大のときの磁束分布から類推できる。

これらの結果より、逆T字形軌道においてもU字形軌道においても磁束密度は目標値 0.005T よりはるかに大であり、磁気シールドが必要であることが明らかとなった。

〈3・2〉 1対の車上コイルにつき1個のシールドコイルがある場合 推進案内用コイルが同極の場合には車上コイルによるシールドコイルの鎖交磁束は常に零となりシールド効果は働かない。U字形軌道は逆T字形から類推できるので、逆T字形、異極で差動の場合を考えてみる。シールドコイルの高さ h_s は 0.7m とする。

第3図において、シールドコイルの長さ $2t$ を 1.6m に固定し、幅 $2s$ を $s=2/3d_1, d_1, 4/3d_1$ と変化したときの磁束密度分布を第8図に示す。図より $s=d_1$ (シールドコイル幅が推進案内用コイル間隔に等しいとき) において、シールドコイルに鎖交する車上

【第8図】 1個のシールドコイルがある場合の磁束密度分布(逆T字形, 差動異極)

Fig. 8. Magnetic fields with a shielding coils.

コイルによる磁束がほぼ最大となり、それを打ち消すシールドコイル電流による磁束も最大となるので最もシールド効果が働くことがわかる。シールドコイル幅 $2s$ を固定して長さ $2t$ を増してもシールド効果はほとんど変わらない。磁束密度の最大値は、最良の場合($2s=1.875\text{m}$, $2t=1.6\text{m}$)でも $2.4 \times 10^{-2}\text{T}$ であり、シールドにより約80%に下がったが目標値以下の領域は1/6以下である。

〈3.3〉 シールドコイルを分割する場合 シールドコイル1個の場合は、推進案内用コイルが同極のときはシールド効果がなく、異極のときでも目標値以下の領域はほとんどない。そこでシールド効果が最良のとき($2s=1.875\text{m}$, $2t=1.6\text{m}$)の1個のシールドコイルを等分割する場合を調べる。逆T字形の差動異極で3個に等分割した場合を第9図に示す。第8図、第9図より、シールドコイル1個のときと比べて磁束密度は平均化されるが、漏れ磁束のためシールド効果はあまり上らないこと、シールドコイル間隔 d_s を小さくするほど磁束の漏れが減少しシールド効果が増すこと、 $d_1 < |y| < d_3$ ($2d_3$ は客室の幅)のところではシールド効果がほとんどないことがわかる。

ここで分割の仕方を考えてみる。異極の場合には2個、4個、…に分割すると、 $y=0\text{m}$ の位置のシールドコイル辺で電流が相殺し、コイル辺がないのと同じとなる。それゆえ3個、5個、…に分割すべきである。同極の場合には3個、5個、…と分割すると、真中のシ-

第9図 シールドコイルを分割する場合の磁束密度分布(逆T字形, 差動異極, 3分割)

Fig. 9. Magnetic fields with partitioned shielding coils.

ールドコイルの鎖交磁束は常に零となりシールドにならないので、2個、4個、…と分割する。但し実際の分割数は数個で十分であると思われる。

また、推進案内用コイルのほぼ真上にシールドコイルの1辺がくる必要がある。

同極で2個、4個と分割した場合も異極の場合と同様の結果が得られた。

〈3.4〉 シールドコイルを網目にする場合

(1) 網目の効果 隣接シールドコイル間の距離 d_s を $d_s=0$ として漏れ磁束をなくすることにより、単に分割する場合よりもシールド効果の向上が期待できる。逆T字形、差動異極で3分割の場合の磁束密度分布を第10図に示す。第9図と比較すると、目標値 0.005T 以下の領域がかなり増加していることがわかる。

(2) y 方向のシールドコイル追加の効果 第9図、第10図の3分割の図よりわかるように、これまでは推進案内用コイルで囲まれる領域($-b \leq x \leq b$, $-d_1 < y < d_1$)においてシールドコイルを考えてきた。しかしこのままでは $d_1 < |y| < d_3$ の範囲でシールド効果はほとんどない。そこで3分割、網目のシールドコイルに更に両縁に1分割ずつ加え、5分割とした場合を第10図に示す。3分割に比べて $d_1 < y < d_3$ の領域で70%程度に磁束密度が減少している。

同極のときは推進案内用コイルで囲まれる領域でシールドコイルを2等分割し、更に外側に1分割ずつ加え4分割とすると、 $d_1 < y < d_3$ で2分割に比べて50%程度に磁束密度が減少する。

(3) シールドコイル高さ h_s の効果 網目としたシールドコイルの高さ h_s の効果を調べるため、これまでのシールドコイルの高さ $h_s=0.7\text{m}$ を構造上可能な最小値である 0.5m にし、車上コイル系に近づける。

逆T字形で異極と同極の場合を第11図(a), (b)に

第10図 シールドコイルを網目にする場合の磁束密度分布(逆T字形, 差動異極, 3分割, 5分割, $h_s=0.7\text{m}$)

Fig. 10. Magnetic fields with net type shielding coils.

第 11 図 シールドコイルを網目にする場合の
磁束密度分布 (逆 T 字形, 5 分割 (異極),
4 分割 (同極), $h_s=0.5\text{m}$)

Fig. 11. Magnetic fields with net type
shielding coils.

第 12 図 シールドコイルを網目にする場合の
磁束密度分布 (U 字形, 5 分割 (異極),
6 分割 (同極), $h_s=0.5\text{m}$)

Fig. 12. Magnetic fields with net type
shielding coils.

それぞれ示す。高さ h_s を小にすることにより、シールドコイル電流が増し車上コイルによる磁束を打ち消すような磁束が増大するので、シールド効果は大幅に向上する。異極で差動のとき最大値は $1.6 \times 10^{-2}\text{T}$ となり、和動のとき最大値は $1.2 \times 10^{-2}\text{T}$ となる。これらにおいて目標値 0.005T より磁束密度の小さい領域は斜線を施した部分であり客室床面の $1/4$ にわたっている。同極の場合は差動のとき最大値は $1.2 \times 10^{-2}\text{T}$ であり、和動のとき最大値は $9.1 \times 10^{-3}\text{T}$ である。目標値以下の領域は差動で $1/2$ 、和動で $2/3$ に及んでいる。異極に比べて同極の方が最大値は小さく、目標値以下の領域は広い。シールドコイル電流の最大値は異極のとき 64kAT (差動) と 61kAT (和動) であり、同極のときは 49kAT (差動) と 45kAT (和動) である。

U 字形で異極と同極の場合を第 12 図 (a), (b) に示す。異極の場合は 5 等分に分割し、同極の場合は 6 等分に分割するときを考える。異極で差動のときと和動のときの最大値はともに $1.1 \times 10^{-2}\text{T}$ であり、目標値以下の領域は、どちらも床面の $3/5$ である。同極の場合は、差動のとき最大値 $1.2 \times 10^{-2}\text{T}$ で和動のとき最大値 $1.4 \times 10^{-2}\text{T}$ であり、目標値以下の領域は差動で

$1/2$ 、和動で $3/5$ である。シールドコイル電流の最大値は異極のとき 59kAT (差動) と 54kAT (和動) であり、同極のとき 59kAT (差動) と 54kAT (和動) である。

これらのうち磁束密度がもっとも小さくおさえられているものは逆 T 字形で和動同極の場合である。このときの磁束密度の最大値は 0.01T 以下であり目標値 0.005T 以下の領域は客室床面の $2/3$ をしめている。それゆえ床敷きの鉄板をパッシブシールドとして利用すれば、全領域で目標値以下へのシールドが可能となる。

これまでは磁束密度の許容される目標値を Iwasa 氏と同じく 0.005T としてきた。これは Aceto 氏らの論文のはとの脳の直流電流が $0.01 \sim 0.03\text{T}$ を境に急に変化するという実験によった数値である。しかし、中川氏の実験のように、マウスについては 0.03T の磁場でようやく磁場の生体作用が検出されたという例もある⁽⁸⁾。もし目標値である 0.005T を 0.01T に変更すれば、逆 T 字形で和動同極以外のどの場合でも薄い鉄板をパッシブシールドとして併用すれば、目標値以下へのシールドがおおむね可能となる。

シールド効果は網目のとき分割数を増すほど増加するが、 $5 \sim 6$ 分割より多くなると飽和してしまう。分割数は少ないほど経済的であり、磁束密度の目標値を満たす最小の数が適当である。

以上の議論をまとめれば、アクティブシールドの最適な構造は、網目構造でシールドコイル高さを低くして、第 11 図と第 12 図に示したように逆 T 字形で異極の場合は 5 分割、逆 T 字形で同極の場合は 4 分割、U 字形で異極の場合は 5 分割、U 字形で同極の場合は 6 分割とする構造であるといえる。

(4) パッシブシールディング (床敷きの鉄板) 併用の効果 前項において逆 T 字形、和動同極のとき床敷きの鉄板をパッシブシールドとして利用することを提案した。そのときの鉄板の厚さを概算してみよう。

逆 T 字形、和動同極のとき、床面における磁束密度 B とその y 方向成分 B_y 、 z 方向成分 B_z を第 13 図に

第 13 図 磁束密度分布 (逆 T 字形, 和動同極)
Fig. 13. Magnetic fields.

示す。ここでは磁束密度が最大である $x=0\text{m}$ の分布を考えるので磁束の x 方向成分は存在しない。床敷きの鉄板が飽和しないときは、客室床面の外からまわりこむわずかな磁束を除いて客室には磁束は存在しない。従って鉄板の厚さは通過する磁束が最大ときでも飽和しないような厚さに選べばよい⁽³⁾。鉄板を通過する最大磁束は $B_x=0\text{T}$ となる $y=1.0\text{m}$ で生じ、最大磁束 Φ_m は磁束密度 $B(y)(=\sqrt{B_y^2+B_z^2})$ を $y=1.0\text{m}$ から $y=1.8\text{m}(=d_3)$ まで積分すれば求まり、

$$\Phi_m = \int_{1.0}^{1.8} B(y) dy$$

となる。ここで、 x 方向は単位長さを考える。鉄板の厚さを d とすれば d の満すべき条件は

$$d \geq \Phi_m / B_s$$

である。ここで、 B_s は鉄の最大磁束密度であり、ここでは 1.3T とする。計算の結果 $d=4.8\text{mm}$ が得られた。客室の床面のうち目標値 0.005T をこえる $1/3$ の部分に 4.8mm 厚の鉄板を敷き残りの $2/3$ に 2mm 厚鉄板を敷くときは、全面に 2mm 厚鉄板を敷くときに比べて、約 0.7t の重量増となる。目標値を 0.01T とすれば、最大値が 0.009T であったのでパッシブシールドリングはもちろん必要ない。

シールドコイルに働く力の最大値は、数値計算の結果、車上コイルに働く力の 4% 以下であり、シールドコイルの支持は容易である。また、シールドコイルを設けることにより推進力に数%の影響が考えられるがここでは触れない。

〈3.5〉 実験例 問題となるシールドコイルは超電導コイルであり、抵抗は零でインダクタンスのみをもつ。そこで超電導コイルであるシールドコイルを模擬するために常電導コイルを用い、コイルのリアクタンス ωL が抵抗 R よりも十分大 ($\omega L \gg R$) となる高周波で実験を行なうことが考えられる。鎖交磁束が零である超電導コイルはインダクタンスをもち零の磁気エネルギー（すなわち零の鎖交磁束）を保存する。外部磁束が侵入すれば電流を誘起して外部磁束を打ち消し鎖交磁束を零に保つ。常電導コイルでも適当に高い周波数の高周波磁束中に置けば、十分な電流を誘起し、超電導コイルの場合と同様に鎖交磁束を零に保つ。それゆえ、高周波による磁気シールド作用をもって超電導のシールド作用を模擬することにし、 $1/16$ の縮尺モデルによって簡単な実験を行なった。シールド効果は周波数を上げるに従い増加したが周波数 100kHz 以上では飽和した。このことはシールドコイルを鎖交する磁束がこの周波数以上ではほとんど 0 になる

第 14 図 磁束密度分布(逆 T 字形)

Fig. 14. Magnetic fields.

ことを意味する。ゆえにこの状態は超電導シールドコイルの状態（鎖交磁束が常に 0 となる）を模擬するものと考えられる。実験は周波数 500kHz で行なった。支持用コイルは影響が小さいので無視した。

$x=0\text{m}$ における客室床面に相当する面での磁束密度をさぐりコイルを用いて測定した。逆 T 字形で異極のときのシールドコイルがない場合と 1 個のシールドコイルがある場合の実験結果を第 14 図に示す。横軸は y 座標であり、縦軸は磁束密度であり、シールドコイルがない場合の $y=0\text{m}$ での値で正規化した。実験値は理論値におおむね一致しており、シールドコイルによるシールド効果を確認することができた。

4. 結 論

超電導磁気浮上列車において車上超電導コイルによる強磁界のアクティブシールドリングの検討を行なった。本論文では、磁界の目標値を Aceto 氏による 0.005T として計算した。その結果次の結論を得た。

(1) 実車モデルにおいて客室床面の磁束密度の最大値は $0.021\sim 0.033\text{T}$ であり、目標値 0.005T よりも $4\sim 7$ 倍大である。また、この目標値以下の領域はほとんどない。

(2) 床面での磁束は推進案内用車上コイルによるものが大部分である。

(3) 推進案内用車上コイルが左右同極のときは、異極と比べて床面の磁束密度は小である。そのうち逆 T 字形軌道で和動同極のとき、磁束密度の最大値は最小となる。

(4) 1 対の車上コイルに対して 1 個のシールドコイルを設けるときは、左右の推進案内用車上コイルにより囲まれる範囲の真上に置くのがよい。しかしながら同極の場合にはシールド効果がなく、異極の場合でも十分ではない。

(5) シールドコイルを分割しても、漏れ磁束を生じシールド効果は大ではない。

(6) シールドコイルを網目にする場合、かなりのシールド効果がある。横方向にシールドコイルを1分割ずつ加え客室をおおうようにシールドコイルを配置すれば、シールド効果の範囲は広がる。またシールドコイルの高さを下げ推進案内用車上コイルに近づければ効果は増大する。

(7) (4)～(6)項より最適なシールド構造はシールドコイルを網目としシールドコイルの高さを下げ、分割数は逆T字形で異極の場合は5分割、逆T字形で同極の場合は4分割、U字形で異極の場合は5分割、U字形で同極の場合は6分割とするものといえる。

(8) 例えば、逆T字形、和動同極(分割数4)のとき、磁束密度の最大値は0.009 Tであり、目標値0.005 T以下の領域は2/3である。それゆえ床敷きの厚さ約5 mmの鉄板をパッシブシールドとして併用すれば、全領域で目標値以下への磁気シールドが実現可

能となる。

(昭和54年8月3日受付, 同55年5月15日再受付)

文 献

- (1) 葛生, 他:「超電導と極低温冷却」鉄道技術研究報告, No. 917(共通編第95号), p. 159 (昭 48-3)
- (2) 山下:「超電導磁気浮上」鉄道技術研究報告, No. 981(共通編第104号), p. 3 (昭 50-3)
- (3) Y. Iwasa: "Magnetic Shielding for Magnetically Levitated Vehicles" *Proc. IEEE*, **61**, No. 5, p. 598 May, (1973)
- (4) H. Aceto, Jr. et al.: "Some Studies on the Biological Effects of Magnetic Fields", *IEEE Trans. Magnetics* **MAG-6**, No. 2, p. 368, June (1970)
- (5) 大熊, 他:「超電導磁気浮上車における磁気シールドについて」電子通信学会技術研究報告, EMC J 78-45, p. 13 (昭 53-12)
- (6) 杉山, 他:「超電導磁気浮上車における磁気シールド」昭54電気学会全大 No. 738
- (7) 宮本:「磁気浮上車両の左右ローリング振動」鉄道技術研究報告, No. 981(共通編第104号), p. 151(昭 50-3)
- (8) 中川:「電磁場のからだへの影響」*OHM Bulletin*, **14**, p. 6 (昭 53)