

I-90

浮上式鉄道ガイドウェイ構造物と電磁界解析

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 山下彰彦

1. はじめに 超電導コイルを車両に搭載する現在開発中の浮上式鉄道システム¹⁾²⁾の営業速度は500km/hから550km/hが考えられている。このシステムが実用化できるようになり、システムコストが他の交通手段と同程度くらいになると、システムの低温技術を他の産業に応用できるし、かつ交通社会基盤に大きな影響を与えるだろう。このシステムでかなりの高速を出せるということは、言い替えると、その高速をだせるだけの強い磁界作用を伴うことであり、ガイドウェイ構造物がある程度の磁場にさらされることになる。ガイドウェイ構造物には推進コイルと浮上コイルが取付けてあり³⁾⁴⁾、マグレブ車両と地上コイルとガイドウェイ構造物は電磁現象面から相互に干渉しあう。浮上式鉄道ガイドウェイ構造物の設計にあたっては、従来の鉄道構造物と異なり、電磁界現象を考慮する必要がある⁵⁾。

車両に近接したところでは、ガイドウェイ構成材料に普通構造用鋼材や鉄筋コンクリートを用いると、磁化による吸引力が発生し、かつ鋼材、鉄筋等に誘導電流を発生させ、結果としてマグレブ車両の大きな磁気抗力をもたらし、走行のための供給電力量が増える。したがって、車両に近接したガイドウェイ側壁部等では低磁性鋼、コンクリート、FRP、カーボン繊維等が適する。しかし、停車場ホームとか車両床部とか車両から遠く離れたガイドウェイ外側部では、磁場の強さを減じることが好ましく、磁気シールドできる材料(普通鋼材等の強磁性体は条件を満たす)がよい。素材の価格が大きく異なる事実からしても、ガイドウェイ構造物は、磁性の弱い材料をまんに、磁性のある材料を外側に配置するのが一つのやり方と思われる。

2. 誘導電流と電磁力の評価 電磁界解析⁶⁾⁷⁾については、スーパーコンピュータの登場とグラフィック表現技術の進展により数萬元の連立一次方程式を解き、解析結果をグラフィック表示することが可能となり、ここ数年いまままで解けなかった問題に手をつけることができるようになった。

マックスウェル方程式から

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{J}$ はそれぞれ、磁束密度、磁界の強さ、電束密度、電界の強さ、電流密度である。また、 ρ は電荷密度である。 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{J}$ の間には次式の関係がある。

$$\mathbf{B} = \mu (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

ここで、 μ 、 ε 、 σ 、 $\mathbf{M}$ は真空中の透磁率、磁性体の誘電率、磁性体の導電率、磁性体の磁化である。

磁束密度 $\mathbf{B}$ での磁性体には、誘電磁化 $\mathbf{M}$ により磁気力 $\mathbf{F}$ とトルク力 $\mathbf{C}$ が加わる。磁気双極子モデルの場合

$$\mathbf{F} = \int (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B} d\mathbf{v} \quad (8)$$

$$\mathbf{C} = \int [\mathbf{r} \times (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \mathbf{M} \times \mathbf{B}] d\mathbf{v} \quad (9)$$

導電体の単位体積に生じる力は

$$\mathbf{f}(\mathbf{r}) = \rho \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times [\mathbf{J}(\mathbf{r}) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')] }{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d\mathbf{v} \quad (10)$$

式(10)で、 $\mathbf{B}$ は他の構造要素の電流、磁化された材料、移動電荷等による磁束密度であり、右辺第3項はBiot-Savartの法則で、位置 $\mathbf{r}'$ の定常電流 $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ が位置 $\mathbf{r}$ の定常電流 $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ に及ぼすものである。

ガイドウェイ構造物の電磁界現象を解析しようとなると、次のような場合に直面する。第一に電流の流れる道筋が場合場合でいろいろな方向に変化する；第二に磁性体により磁束分布がかなり歪められる；第三に広い空間にわたって電磁界現象が生じる；第四に移動通過するコイルを取り扱うという点である。ガイドウ

ェイ構造物での強磁性体(普通鋼が代表的)の誘導電流については、有限要素法で磁気ベクトルポテンシャルを用いて解析を行えるところまでになった⁸⁾。図1, 図2, 図3に計算結果を示す。有限要素法で磁気ベクトルポテンシャルを用いた解析では、空气中磁界変動が100MHzに比べて十分に遅い場合を取り扱うものとし、変位電流 $\partial \mathbf{D} / \partial t$ を無視している($\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}$ (2))。そのためマックスウェルの方程式は式(1)、(2)、(4)だけで閉じた形になり、式(3)は単なる ρ の定義式として解いている⁹⁾。電磁力も式(8)、(9)の部分を追加すれば計算値はでるが、有限要素法の手法だと厚板での解析精度を追うのにはいいかもしれないが、薄板の電磁力の解析精度を追うには、そのための必要演算量から見ると必ずしもいい方法とは言えない。特に解析対象のガイドウェイ構造物の材料の存在による磁束分布の歪みが小さい時、有限要素法以外の方法はより有効になりうる。鉄道総合技術研究所では低磁性鋼の橋梁設計用として、現在、プログラムJRMAGを持っている。空気領域を計算対象領域にせず(未知数の数は著しく小さくなる)、磁場の歪みを取り込める解析法はまだ世に存在しない。このような解析法開発は試みられているが。

3. あとがき 3次元の変動磁界での解析はここ2～3年COMPUMAG国際会議で取り扱うようになった。この変動磁場というのは定置コイルに流れる電流が時間的にかわるというもので、コイルが移動し磁性体が存在する変動磁場問題は現在進行中の状況である。

参考文献

- 1) Yoshihiro Kyotani, and Hisashi Tanaka, "Present Status of JNR Maglev Development", Inter-national Conference on Maglev and Linear Drives, pp41-45(1986)
- 2) 鉄道総合技術研究所: リニアモーター・マグレブ, 1988年12月
- 3) 高野・斉藤・萩原: 超高速列車の磁気浮上系の設計と軌道方式の比較, 電学論B, 95, PP105-112, 昭和50年3月
- 4) 藤原俊輔: 浮上コイル側壁配置磁気浮上方式の特性, 電学論D, 108, PP439-446, 昭和63年3月
- 5) A. Yamasita: "Electromagnetic Phenomena on Guideway Structure of Magnetic Levitation", the 1st International Symposium on Applied Electromagnetics in Materials, Tokyo, pp191-195, October 1988
- 6) 宮健三: 電磁弾性論とその応用(I), 日本造船学会誌, 第681号, pp2-5, 昭和61年3月
- 7) 宮健三: 核融合炉における電磁現象, 「材料中の電磁現象の解析」講演論文集, pp19-25, 昭和63年2月
- 8) 山下・酒井: 浮上式鉄道ガイドウェイ構造物における電磁界解析, 第11回計算電気・電子工学シンポジウム論文, pp53-58, 1990年3月
- 9) 池田文昭: 動磁界解析におけるスカラーポテンシャルの役割, 電気学会静止器回転器合同研究会資料 SA-88-29, RM-88-51, pp11-20

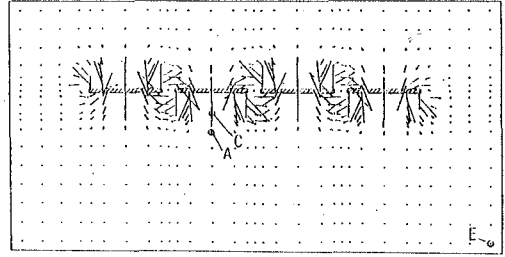
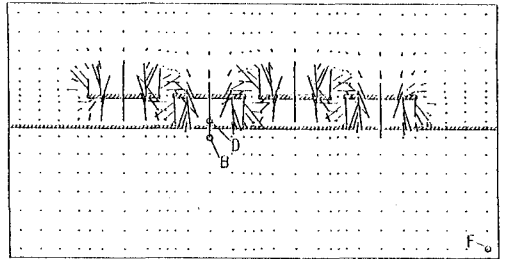


図1 磁束密度分布(4コイル、鉄板なし)



A点はB点の約10倍、C点はA点の約2倍橋梁
図2 磁束密度分布(4コイル、鉄板あり)

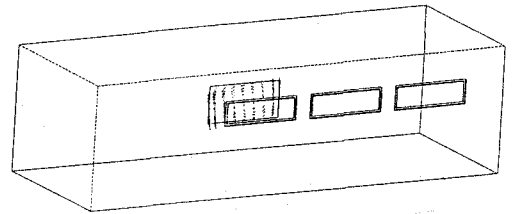


図3 鉄板の渦電流(変動磁界、3コイル)