

# 磁界の流れを探る

笹川 卓

浮上式鉄道技術研究部(電磁力応用 研究室長)



ささがわ たかし

## はじめに

磁界は川の流れるように目に見えませんが、風のように体を感じることもありません。しかし磁界も流れの一種であり流れとして捉えれば理解もしやすくなります。本稿では磁気シールド(磁界の遮蔽)の設計を例に取って、磁界の流れの説明を行いたいと思います。

まず“流れ”とはなんですか。これを一言でいうと、空間の各点で方向と大きさを持ったものであるということができるといえます。例えば温度分布を考えてみます。これは空間の各点である値(この場合温度)を持っていますが、これは“流れ”ではありません。温度分布には大きさはありますが、方向が無いからです。次に風を考えてみます。これは空間の各点で大きさ(風速何mというあれです)とともに、南西だとか北北東だとかいう向き(風向)を持っています。このように風は空気の“流れ”であり、本稿で取り扱う流れの一例になっています。これと同様に磁界も流れ一種であることを、以下では磁気シールドを例にとり、順に述べていきたいと思います。

## 磁気シールド

磁気シールドとは、種々のメカニズムにより、ある領域から磁界を排除もしくは低減しようとするものです。この技術は、超電導磁気浮上式鉄道では主に車上に搭載した超電導磁石(Super Conducting Magnet:SCM)の定常磁界(時間的に変化しない磁界)を車内で低減するため、また電気鉄道では二三の電気機器の発生する磁界を低減するために、それぞれ一部に導入されています。

次に磁気シールドの原理を示します。図1のように磁性体(「磁界の流れ=磁束」が流れ易い物質)を用いてそこに磁束を集めることにより、その他の部分の磁界を低減するものです。これは磁性体により、磁界の流れのバイパスを作るようなものです。この方法では基本的に磁気シールドを施したい対象を磁性体で覆うことが必要になります。図1では球殻上の磁性体の内部の磁界を遮蔽しています。ここで注意したいのは、磁気シールドを施すことにより磁界が上昇する部位もあることです。そのためにも、磁界の流れをよく把握して磁気シールド技術を用いる必要があります。

## 磁界の流れと電気回路

磁界の流れとしてどのようなものをイメージしたらよいでしょうか。流れですから身近な例としては図2のような

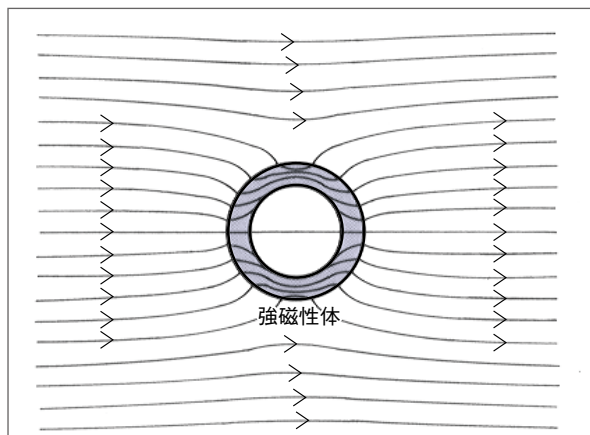


図1 強磁性体を用いて磁気シールドする方法<sup>1)</sup>

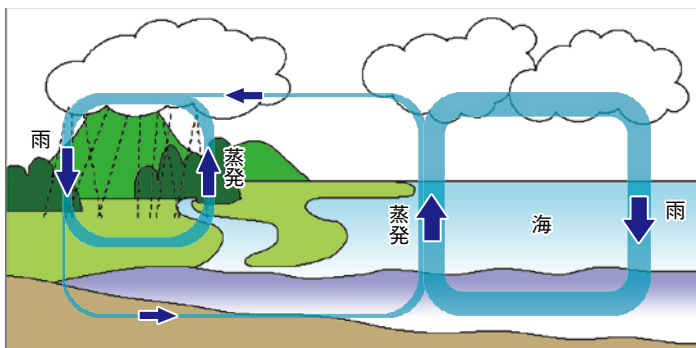


図2 磁界の流れの水流への類推

表1 磁界と電気回路の対応

| 磁界(磁気回路)に関する量                     | 電気回路に関する量      |
|-----------------------------------|----------------|
| 電流 I (磁位)                         | 電圧 V           |
| 磁界 H                              | 電界 E           |
| 磁束 $\Phi$ (磁界の流量)                 | 電流 I           |
| 透磁率 $\mu$                         | 電気伝導率 $\sigma$ |
| 両者の幾何学的な量はそのまま対応<br>(例: 断面積、長さなど) |                |

循環する水の流れが対比できると思います。注意していたきたいことは、磁界の流れはどこから(水道の蛇口のように)湧き出したり、(流しのシンクのように)吸い込まれたりせず、図2の水と同様に循環しているということです。ですからどこから来た磁界は、必ず元の場所に戻っていき一本の閉じた輪(閉ループ)を構成することが特徴です。

磁界については表1のように電気回路と対応させて考えると更に理解が容易になります。電気(電流)は流れやすい導体の内部に流れますが、磁界も同様に磁界(磁束)に取って流れやすい性質を備えた磁性体中を流れます。よく使われる類推ですが、磁束を電流に、磁界の流れ易さを表す透磁率を電気伝導率に、強磁性体を導体に、強磁性体以外の部分(例えば空気)を低電気伝導率の媒質に置き換えるとわかりやすいと思います。

この類推を用いてもう一度説明しますと、磁気シールドとは磁界の流れ(磁束)をより流れやすい領域(磁性体)を配置してそこに誘導することにより、目的とする他の場所の磁界を低減することだといえます。又用いる強磁性体の透磁率が高いほどまたその強磁性体の厚みが厚いほど、磁気シールドの効果が高まります。図3右のように磁気シールド(図3電気回路中のR1に相当、以下電気回路の対応物を[]書きで示す)を追加することにより、磁界[電流]がそちらに誘導され、磁気シールドを施したい側の空間[R0]を流れる磁界[電流]が減少するというものです。一般には磁気シールド[R1]に流れる磁界[電流]が多いほど、もとの空間[R0]を流れる磁界[電流]が減少し、その結果磁気シールド効果が向上します。そのためには磁気シールド[R1]の磁気抵抗[電気抵抗]を小さくすることが肝要です。例えば、磁気シールド材料として磁界の流れやすい透磁率の高い材料を選定[R1として電気伝導率の高い材質を使用]したり、磁気シールドを厚くする[抵抗R1の断面積を大きくする]ことが有効です。

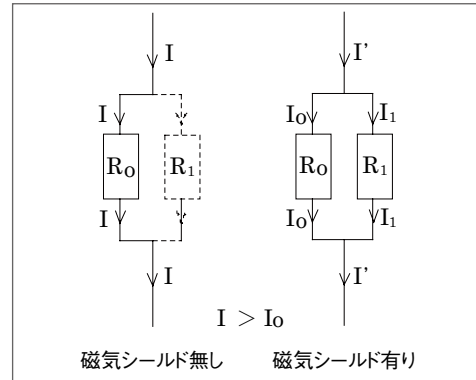


図3 磁気シールドの原理の電気回路による説明

このように磁界の流れと電気回路中の電流には多くの共通点がありますが、一方では両者間には二つの大きな違いも存在します。一つは磁性体または電気回路における導電体以外の大部分を占める空気中の扱いです。電気回路においては、空気はほぼ絶縁体と見なすことができ、導体として使われる通常の金属(銅、アルミ)との電気伝導率の比は10の10乗程度以上になります。一方磁性体と空気中の磁界の通りやすさの差(これを表す量として比透磁率という概念があります)は、通常では10の3乗程度の比にしかなりません。この違いのため、電気回路では電流の通り道として空気を無視できますが、磁界の流れ(これを磁気回路といいます)を考える場合には空気中の部分の磁界の流れを一般には無視できません。そのため磁界の流れは磁性体の中に閉じこめられず空気中にも漏れて広がりますので、その扱いが電気回路に比べて複雑になります。

もう一つの大きな違いは、磁性体中を流れる磁界の量には上限があるということです。電気回路中を流れる電流には、その明確な上限はありません。電圧を高くすれば原理的にはいくらかでも多くに電流が流れます(もちろんあまり多くの電流を流すと発熱して導体が焼き切れてしまうため、その意味では流せる電流に限界がありますが)。一方磁性体中を流れる磁界の量には明確な上限があり、これを飽和磁束密度といいます。

浮上走行する磁気浮上式鉄道車両にとり、車両本体およびその車載機器の軽量化は課題の一つであり、磁気シールドについてもその例外ではありません。そのため浮上式鉄道車両の磁気シールド用磁性体としては同一重量で磁界をたくさん流せる材料(飽和磁束密度が高い材料)を使うことが必要になります。これは喩えて言うと、軽くても水がよく流れる水道管を使うようなものです。

### 浮上式鉄道の磁気シールド

本稿で取り上げる超電導磁気浮上式鉄道の磁気シールド

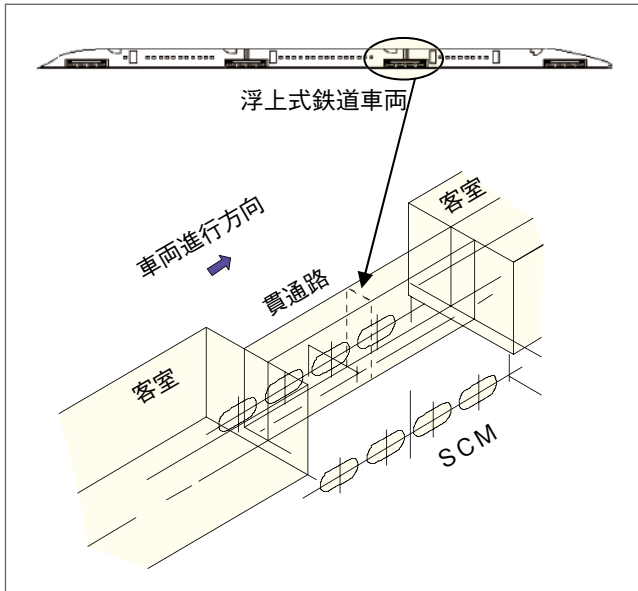


図4 磁気浮上式鉄道車両とその台車近傍の拡大図

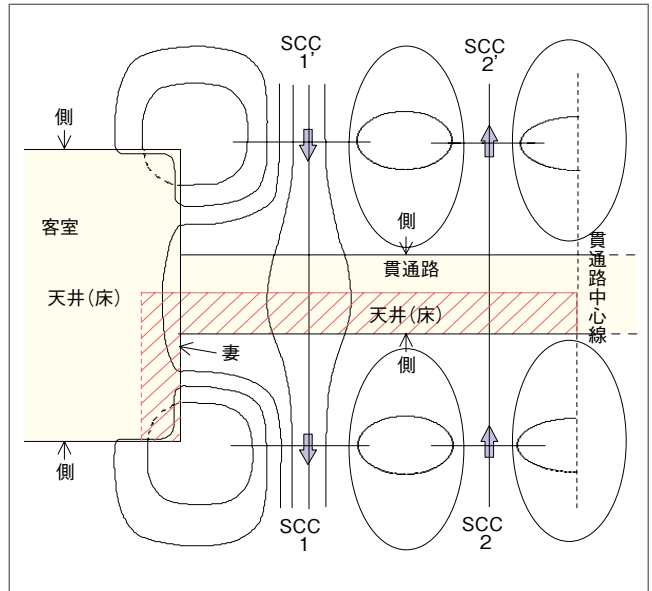


図5 磁界の流れの概略図(上から見た図)

は、以下のごとくSCMの生成する磁界から、車内の旅客用空間を磁気シールドしようという課題です。図4の上は浮上式鉄道車両(部分)であり、車体と車体との間それぞれには、強力なSCMを搭載した台車が配置されています。各台車近傍の拡大図を、図4の下に示します。図4上に示すごとく、SCMを含む台車は、二つの車体間を橋渡しするように配置されており、例えば3車体を4台車で支えるというような構成になります。このような台車構成を連接台車方式といいます。二つの車体間のちょうど台車の直上にあたる部分には、旅客の通り抜けのための幅の狭い通路が設置され、貫通路と呼ばれています。また貫通路の両端には、それぞれ客室が接続しています。以上の配置から、SCMの作る磁界から磁気シールドすべき空間は、台車上部の貫通路とそれに隣接する客室部ということになります。一般的には磁気シールド板は磁界の弱い天井には無く、貫通路の側と床のみに施されます。

さて磁界の流れの概略(台車左半分に相当)を図5に示します。貫通路では比較的単純な磁界分布ですが、隣接する客室端部では複雑な形状をしていることがわかりますね。

更に貫通路について磁束の流れをもう少し詳しく見たものが、図6です。貫通路の左下1/4部分(図5の下半分に相当し赤斜線で表示した部分)のみ示していますが、床板シールド板では案内方向に側板シールド板では進行方向に磁束が流れている様子がわかります。なお以下の磁束のうち大部分は磁気の流れやすい磁気シールド板の中を流れ(破線で表記)、貫通路内の空気中を流れる磁束(波線で表

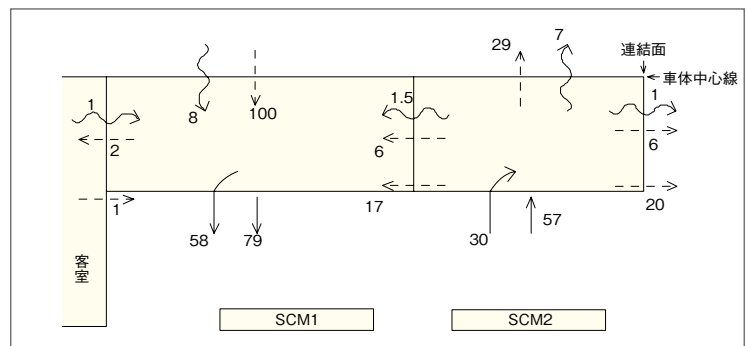


図6 貫通路の磁束の流れの様子(実測磁束のうち最大のを100として規格化)

記)は総量の10%以下です。また磁束の収支バランスがほぼ取れていること(磁束の湧き出しや吸い込みが無いこと)も、図6を注意深く見るとわかります。なお実線は各超電導コイルから磁気シールド板各部に流入/流出する磁束を表しています。

### 磁気異方性材料を用いた磁気シールド貫通路部 磁気シールド性能の向上

ここでは試みの一つとして、貫通路部磁界の低減の検討

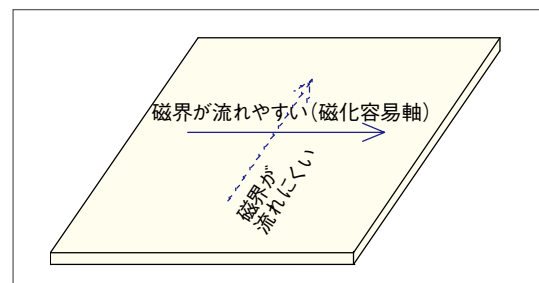


図7 磁気異方性材料の概略図

を行った結果を簡単にご紹介します<sup>2)</sup>。磁性体の中には方向により磁界の流れやすさが異なる材料があります。そのような性質のことを磁気異方性といいます。

さて磁界の低減のためには高透磁率材料を用いる必要があるといただきましたが、現時点で高飽和磁束密度（軽量化のため）と高透磁率（磁界低減のため）を両立できる材料として、方向性電磁鋼板が考えられます。その名のごとく、方向性電磁鋼板は磁気異方性材料の代表的なものの一つです。この材料の代表的なB-Hカーブ（磁気を流そうとする力に対しどのくらい磁気流れるかを表すカーブ）を図8に示します。比較として

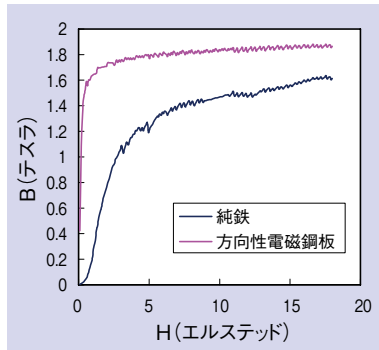


図8 現実の磁性材料のB-Hカーブ

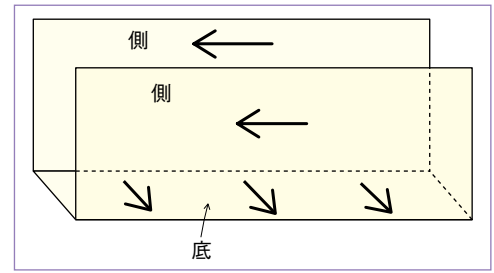


図9 貫通路における方向性電磁鋼板製磁気シールドの磁気容易軸方向の設定

純鉄のB-Hカーブも示しています。このB-Hカーブの傾きが急であればあるほど、磁界を流しやすいことを示しています。このように方向性電磁鋼板は、一方向には非常によく磁束を流すことができるので、上手に利用すると磁束のバイパス効果（図1, 3）、引いては磁気シールド効果を高めることができます。しかしそのためには対象の磁界分布、とりわけ磁界の方向を事前に把握する必要があります。

もう一度図6をご覧ください。貫通路については床板シールド部分では磁界は主に案内方向に、側板シールド部分では車両進行方向に流れていることがわかります。そこで図9のように磁化容易軸（磁性体の磁界が流れやすい方向）に向けた磁気シールド板を製作して試験を行いました。その結果従来と同程度の重量で貫通路部の磁界を1/2～1/3程度に低減することができました<sup>2)</sup>。

なお磁界の流れの特徴を掴むことにより、“どこに、またどの方向に磁気シールドの切れ目を設けない方がよいか”といったことも判断することができます。磁気シールド板の切れ目は一般に磁界の流れを妨げますが、磁界の流れる方向に平行に切れ目を設定できれば、その悪影響を最小限にすることができます。水の流れの中に板（これが磁気シールド板の切れ目に相当します）を置く場合に、板の面を水の流れに平行に置けば水の流れにほとんど影響を与えませんが、流れに垂直に置くと水の流れは大幅に乱れるようなものですね（図10）。

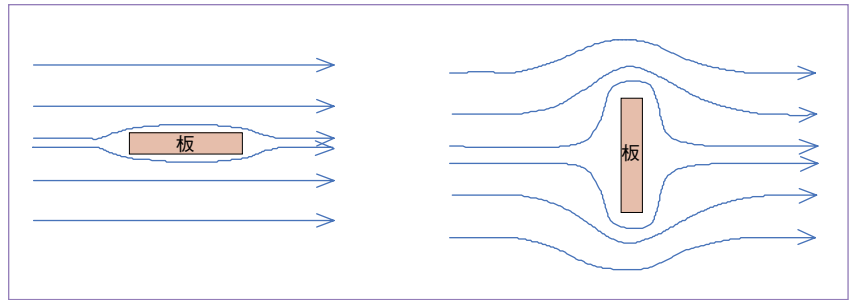


図10 水の流れの中の板

## おわりに

「方向も含めて磁界分布を把握することは、現象の理解のみならずより合理的な磁気シールド構造の設計に有効である」ということが、本稿で主張したかったことがらです。

磁気シールドは、電気回路と違って磁性体外である空気中の磁界の流れを無視できないため、取り扱いが数値計算上複雑になる面はありますが、原理的・直感的には理解しやすい現象であると思います。磁気シールド技術は浮上式鉄道固有の面もあり今後とも実用化に向けて重要な技術の一つと考えられますので、磁界の流れの理解に基づいたより高性能な磁気シールドの設計に取り組んでいきたいと考えています。なお本稿で取り上げた試験の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施したものです。

最後に本稿ではわかりやすい表記を心がけたため、磁界の用語に対して不適切なところや混用している部分もありますがどうかご容赦下さい。また本稿で取り扱ったのは時間的に変動しない磁気の流れ（静磁場現象）です。時間変化する場合も複雑にはなりますが、磁界が流れの一種であることには変わりはありません。RRR

## 文献

- 1) 大崎博之他(1996)：特集磁気シールド技術，電気学会誌，116巻，4号，pp.203-222
- 2) 笹川 卓・田川直人・戸来年樹(2005)：浮上式鉄道用直流磁気シールド特性の改善，鉄道総研報告，第19巻，第6号，pp.41-44