

マイスナー効果が見える磁力線観察

斎藤吉彦 大阪市立科学館 大阪市北区中之島4 - 2 - 1

磁力線を多人数で観察する2通りの方法を考案した。これらは大型ネオジウム磁石が生じる磁力線を見せるもので、取り扱いが非常に簡単である。一つは多数のゼムクリップが自由に回転することで、2次的に磁力線を描くものである。もう一つは、空間を細分化することで、数 cm の針金が3次的に磁力線を描くものである。後者の方法で高温超伝導体によるマイスナー効果や電磁誘導が可視化される。さらにこれを用いて展示装置を製作し、大阪市立科学館で公開している。

1. はじめに

現代物理学では重力場や電磁場など場は最も基本的な概念のひとつである。しかし、市民が場をイメージすることはほとんどないので、現代物理学を市民に語るのに困難なことが多い。磁力線はそれを可能にする稀なものがある。そこで、磁力線を大きな現象として見せることができ、取り扱いが簡単な教具が求められる。著者はこのような教具を考案し、大阪市立科学館のサイエンスショー「だれも知らない磁石のひみつ」で使用した¹⁾。これは大型ネオジウム磁石²⁾の磁力線を大きく描き出すものである。この教具の一つを展示装置として製作し、大阪市立科学館で公開している。また、この磁力線観察は超伝導現象のマイスナー効果や電磁誘導を可視化する。

これまでマイスナー効果として演じられてきたものは、図1のように超伝導体が磁石を反発する様子を見せるものであった。しかし、図1のような現象はマイスナー効果ではなく、正しくはマイスナー効果の結果生ずる現象である。マイスナー効果とは「超伝導体を磁場中においてみると、磁束は超伝導体内部に浸入しない。」³⁾という現象なのである。また、電磁誘導として演じられてきたものは、磁石とコイルの相対運動による起電力を示すものがほとんどであった。しかし、電磁誘導は次式のように起電力 V の起源を磁束 m の変化とするもので、磁石の運動をその起源とするものではない⁴⁾。

$$V = - d m / dt \quad (1)$$

この局所的表現がマクスウェル方程式の次式である。

$$\text{rot} \boldsymbol{E} + \boldsymbol{B} / t = 0 \quad (2)$$

ここで \boldsymbol{E} は電場、 \boldsymbol{B} は磁束密度である。これは磁束密度

\boldsymbol{B} の時間変化 (右辺第二項) と電場 \boldsymbol{E} との関係を与えるもので、左辺第一項は微小閉曲線に沿って単位電荷が一周したときの電場 \boldsymbol{E} がする仕事 (微小閉回路に生じる電圧 V) に比例する量である。

すなわち、マイスナー効果も電磁誘導も、本質である磁力線の様子を表現する演示はほとんどなかったのである。本稿で紹介する磁力線観察を用いると、磁力線によるマイスナー効果や電磁誘導の観察が可能で、場の概念による本質的な演示が可能となる。マイスナー効果に関しては、このように明瞭に、また大きなスケールで示したのはこれが初めてであろう。

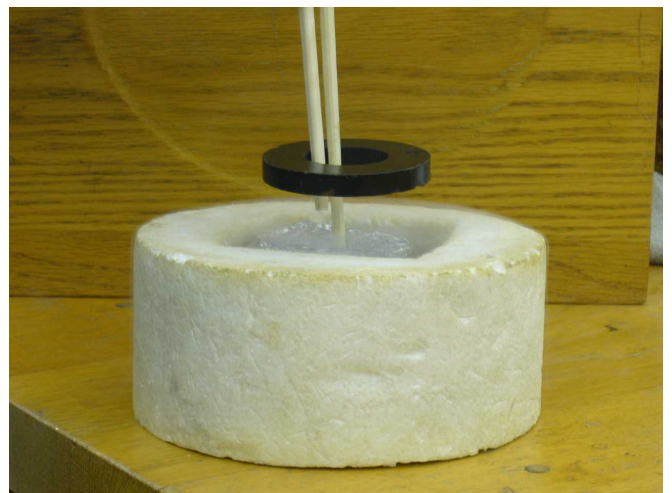


図1. 液体窒素で冷却された高温超伝導材がネオジウム磁石を反発する様子

以降、2章では2通りの磁力線観察方法、およびこれらを利用したマイスナー効果と電磁現象の演示について、3章では磁力線観察の展示を、4章ではまとめを述べる。

2. 磁力線観察

2.1 ゼムクリップによる磁力線観察

観察装置はゼムクリップを付けたストロー片を銅釘で木板上に串刺しにしたものである。多数の強磁性体が自由に回転しさえすれば何でもよいが、この方法は加工が非常に簡単である。図2はストロー片が大型ネオジム磁石の磁力線を描いた様子である。磁力線の乱れを避けるために、鉄釘でなく銅釘を使用している。また、ゼムクリップの自由度は回転だけなので、重力の影響を受けずに磁力線が鮮明に描かれる。



図2. ゼムクリップによる磁力線観察。ゼムクリップの運動は回転だけなので、磁力線は重力の影響を受けず鮮明に表れる。

2.2 3次元的磁力線観察

図3は透明の容器に数cmのビニールタイ⁵を入れ、空間を細分したもので、ビニールタイが大型ネオジム磁石の磁力線を3次元的に描いた様子である。空間を細分することで、ビニールタイは並進運動が制限され磁石の近



図3. ビニールタイで見る大型ネオジム磁石の磁力線。アクリルケースで空間を細分し、ビニールタイの併進運動を制限することで、磁力線が大きく現れる。迫力ある磁力線の出現に見学者の興味が喚起される。

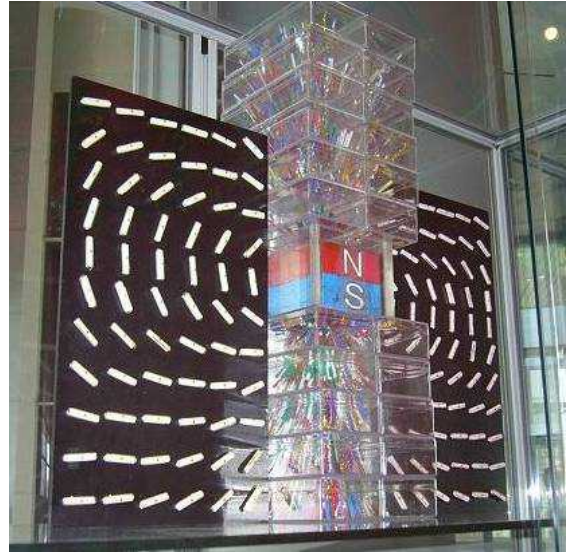


図4. 2つの磁力線観察を組み合わせた場合。N極から出た磁力線がS極に吸い込まれる様子を大きく見せる。傍に集中することがない。その結果、磁力線の空間的な広がりが観察可能となる。図4は以上の2つの方法を併用した一例で、N極から出た磁力線がS極に吸い込まれる様子を表す。磁力線が大きく描き出されるので、多人数で観察できる。

2.3 マイスナー効果

マイスナー効果は「超伝導体を磁場中においてみると磁束は超伝導体内部に浸入しない。」³という現象である。3次元的磁力線観察はこの現象を可視化する。図5がそれで、大型ネオジム磁石の上部に超伝導体⁶を置き、その近傍にビニールタイを配したものである。上図はビニールタイを超伝導体上部のアクリル板に配したもので、下図は多段のアクリルケースにビニールタイを入れ、正面から見た様子である。いずれも、磁力線が超伝導体に浸入しないことを示している。これまで、マイスナー効果として演示されてきたのは、図1のように超伝導体が磁石を反発する現象であった。しかし、これはマイスナー効果によって生じる現象であり、マイスナー効果そのものではない。この演示は、マイスナー効果の本質を見せるものであり、現象が大きいので多人数での観察も可能である。

2.4 電磁現象

電磁誘導は(1)のように起電力の起源を磁束の変化とするもので、磁石の運動にその起源を求めものではない。しかし、これまでなされてきた多くの演示は磁石の運動で起電力を表現するものであった⁴。上記2つの磁力線観察方法は、電磁誘導における磁力線を可視化

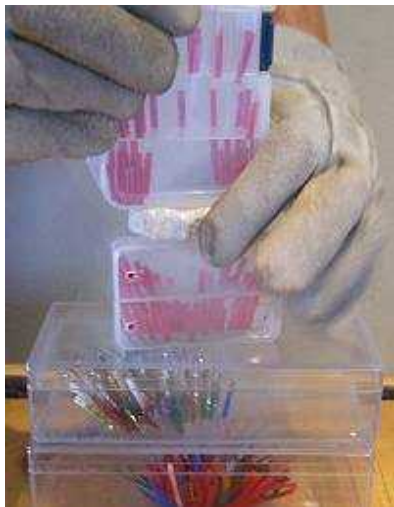
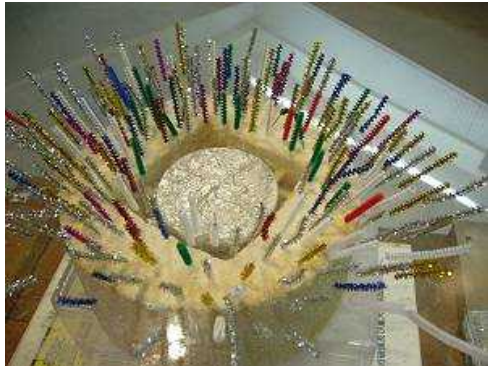


図5．大型ネオジム磁石上でのマイスナー効果。超伝導体は大型ネオジム磁石の上部にあり，その近傍の磁力線の様子をビニールタイが描いている。上図は超伝導体の上にアクリル板を置き，ビニールタイをばら撒いた様子。超伝導体の上部にビニールタイが位置することがなく，超伝導体から磁力線が出ていないことが分かる。下図はビニールタイを入れた多段のアクリルケースを超伝導体の上下に置いたところ。超伝導体近傍に磁力線のない事が分かる。

するものである。たとえば，LED を結線したコイル（23000 巻き）を大型ネオジム磁石の近傍で動かし，そのときの磁力線の様子と LED の点灯とを同時に観察することで，磁力線がコイルを切ると起電力が生じることを理解させることができる（図6）。これは，(1)の電磁誘導を視覚的に理解させ得るもので，本質的な演示となる。電磁波の理解へも発展可能である。

金槌の上下にビニールタイを配することで，鉄による磁力線の吸い込みと湧き出しを見せることができる（図7）。これはマクスウェル方程式の次式を例示する。

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

これは，空間のいたるところで磁力線の湧き出しや吸い

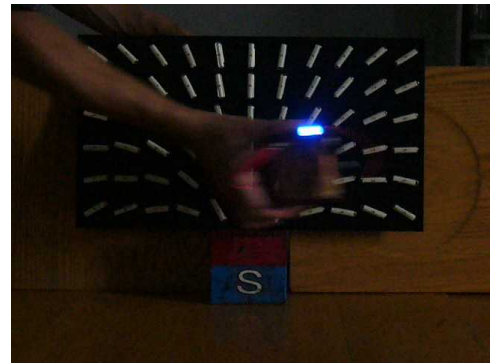


図6．2次元磁力線観察装置による電磁誘導の観察。コイルを左右に動かすとLEDが点灯する。コイルを貫く磁束の変化を想像させながらLEDの点灯を観察させることで，電磁誘導の本質へ導くことが可能。



図7．金槌が磁力線を下部から吸い込み上部から湧き出す様子を見せたもの。 $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ を表現する。込みのないことを表すもので，N極やS極が単体では存在しないことの数学的表現である。すなわち，磁力線が空間のどこかで切れることがないことを意味するもので，図7はまさに(3)式を鉄の内外で見せている。

3．磁力線観察の展示化

図8は大阪市立科学館の展示装置「磁石の花」で，2章の3次元磁力線観察を展示化したものである。装置の中央部には大型ネオジム磁石があり，見学者は自由にこれを回転させることができる。上下左右に配したビニールタイが磁力線のダイナミックな変化を描く。LEDを結線したコイルを近づけることで磁力線の変化を起源とする電磁誘導が観察できる。

見学者は迫力あるビニールタイ群の運動に魅せられ，無意識のうちに磁場を視覚的に体験する。構造が単純なので，メンテナンス性も非常によい。子どもたちは興奮のあまり一杯操作するが，この扱いにも十分耐えている。



図8．磁力線観察の展示化。中心部にある大型ネオジム磁石を自由に回転させることができる。その回転に応じて、ピニールタイが磁力線を3次元的に描く。見学者はこの動きに夢中になり、無意識のうちに磁場を観察する。

4．まとめ

磁力線観察の方法を2種類考案した。これらは現象を大きく見せ、さらに取り扱いが簡単なので、効果的な教具である。これらの方法で、マイスナー効果や電磁誘導における磁力線が観察でき、場の概念を伴った本質的理解が視覚的に可能となった。3次元磁力線観察を展示化し、大阪市立科学館で公開している。磁力線を自由に観察するもので、多くの見学者を魅了している。

ここで図5の意義について述べる。超伝導状態は次の2つの性質で特徴付けられる。一つは完全導体（電気抵抗0）であり、もう一つは「超伝導体を磁場中においてみると、磁束は超伝導体内部に浸入しない。」というマイスナー効果である³。超伝導現象の演示はこれらのことから考察されることが理想であるが、演じられるのは、図1のような超伝導体が磁石を反発する様子がほとんどである。また、図9のように超伝導体と磁石との距離が一定に保たれる様子が演じられることもある。さらに磁石で作ったレールの近傍で超伝導体が浮いてジェットコースターのように宙返りなどをしながら滑走する様子が



図9．高温超伝導体をネオジム磁石の下方近傍で冷却すると、これらの相対的な位置が固定される。ネオジム磁石を持ち上げても(左)、横向きにしても(中)、裏返しても(右)超伝導体とネオジム磁石の相対的な位置は変化しない。

演じられることもある。このような意外性のある現象が見学者の興味を強く惹きつけている。しかし、超伝導現象の本質からこれらの奇異な現象が考察されることはほとんどなく、リニアモーターカーの原理と誤解を与える場合が少なくない。磁力線のあり様からこれらの現象を解説すべきであるが見学者にとって困難なことが多い。実際、著者は磁力線の振る舞いによる解説を試みてきたが、見学者にとって現実味のないものようであった。ところが図5のようにマイスナー効果における磁力線が示せるようになったので、「超伝導体が磁石を反発するのは、マイスナー効果によって超伝導体が磁石の磁力線を反発しているからである。」と解説できる。図9の現象も図5と同様磁力線の観察が可能である。したがって、見学者にとって奇異な現象の数々であった超伝導現象の演示が、図5のような演示を加えることで、本質的な考察へ導くことが出来るようになったのである。電磁現象においても図6や図7のような演示で本質的な考察へ導くことが出来る。

以上を可能にしたのは大型ネオジム磁石であるが、本稿の観察方法を小型化すれば、個人が自由に観察できる教具にも発展するであろう。広く普及することを願う。

新日本製鐵(株)先端技術研究所新材料研究部には、著者の演示構想に理解いただき高温超伝導バルクを提供いただきました。特に同社の手嶋英一氏には様々な相談に快く応じていただきました。厚く御礼申し上げます。(有)彩美術工房の松井俊二氏には展示装置「磁石の花」を製作していただきました。松井氏には著者のさまざまな注文を検討いただき、すばらしい装置に仕上げていただきました。ここに謝意を表します。

¹ 斎藤吉彦 大阪市立科学館研究報告 17 (2007)121
<http://www.sci-museum.jp/~saito/>

² 10cm角、表面磁束密度は0.5T。MRIに用いられるもの。磁石工房より入手可能。

³中嶋貞雄：「超伝導入門」培風館(1971)

⁴ 大阪市立科学館の展示「磁力線を見よう」は起電力の起源を磁力線の変化として表現したものである。
<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/exhibit/text/4-611.html>

⁵ 菓子袋などを閉じるのに使われるもので、カラフルな樹脂でコーティングした針金。見やすくするために、これを使用した。

⁶ 新日本製鐵(株)製高温超伝導バルク材

大阪市立科学館

“Observations of magnetic field lines with visualization of Meissner effect” by SAITO Yoshihiko

