

超伝導現象を含む磁力線ダイナミクスの大型演示

齋藤吉彦 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。これらの方法で、超伝導現象や電磁誘導などにおける磁力線の様子が可視化される。さらにこれを用いて展示装置を製作し、科学館で公開している。

キーワード 磁力線, 超伝導, マイスナー効果, ピン止め効果, 電磁誘導

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。また、学校現場でも磁力線は最も基本的な概念の一つであるが、生の現象を多人数に見せるのは困難である。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」で使用し好評を得た¹。これは大型ネオジム磁石²の磁力線を大きく描き出すもので、100人を超える見学者に対して演示可能な教具である。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、この方法で超伝導現象や電磁誘導などにおける磁力線の振る舞いが可視化される。すなわち、超伝導現象の特質であるマイスナー効果、「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という現象が観察できる。さらに、磁力線のピン止め効果が観察できる。また、電磁誘導は起電力の起源を磁束の時間的変化とするものであるが、この様子が可視化される。

以降、2章では2通りの磁力線観察方法について、3章では超伝導現象における磁力線観察を、4章では電磁現象における磁力線観察を、5章では、まとめとして、本稿の磁力線観察の意義を議論する。

2. 大型磁力線観察装置

本章では2次的に磁力線を見る方法と3次的なもの2種類を与える。

2次的方法は、図1のようにゼムクリップを付けたストロー片を銅釘で木板に多数串刺しにし、これらが自由に回転するものを使用する。強磁性体が自由に回転しさえすれば何でもよいが、この方法は工作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。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1. ストロー片にゼムクリップを付け、自由に回転できるように銅釘で串刺しにする。



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。

3次的方法は透明の容器に数cmのビニールタイ⁴を入れ、それを大型ネオジム磁石の周囲に積み上げたもので、ビニールタイが磁力線を3次的に描くものである(図3)。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見え観察可能となる。



図3. ビニールタイで見る大型ネオジウム磁石の磁力線。アクリルケースで空間を細分し、ビニールタイの並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

上記の2種類の方法は大型ネオジウム磁石の磁力線を大きく描き出すので、100人を超える見学者に対して有効である。また、加工も取り扱いも極めて簡単である。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。

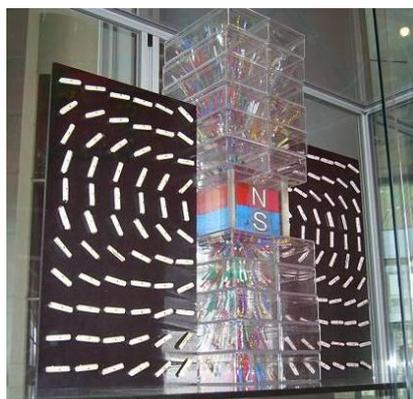


図4. 2つの磁力線観察を組み合わせた場合。N極から出た磁力線がS極に吸い込まれる様子を大きく見せる。

3. 超伝導現象の観察

超伝導の演示の多くは図5のように超伝導体と磁石とが反発する様子を見せるものである。これは「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というマイスナー効果の結果生ずる現象である。しかし、見学者にマイスナー効果を紹介するのは非常に難しいので、図5の現象をマイスナー効果と称してしまうことが多い。

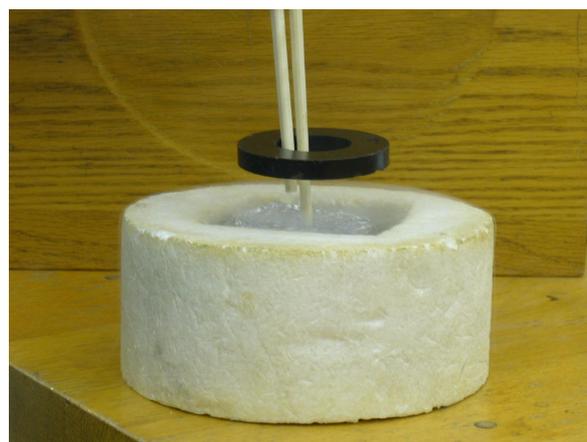


図5. 高温超伝導体がネオジウム磁石を反発する様子



図6. マイスナー効果。超伝導体は大型ネオジウ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た様子。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。

マイスナー効果の本質に迫るには、図5のような演示だけでは不十分で、超伝導体近傍での磁力線を可視化する必要がある。これを実現したのが図6（動画は著者のWEBサイト⁵を参照）で、大型ネオジウ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ときのものである。上図はビニールタイを超伝導体上部の亚克力板に配したもので、下図は多段の亚克力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。マイスナー効果を可視化した演示はこれが初めてであろう。この意義については6章で議論する。

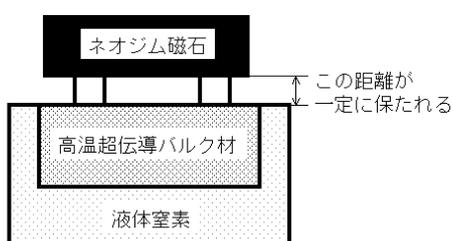


図7. 高温超伝導体を上図のようにして冷却すると、ピン止め効果により超伝導体と磁石の相対的距離が固定される（下図）。

図7はさらに印象付ける演示で、超伝導体と磁石とが隙間をあけたまま相対的位置が固定される現象である。これは図7（上）のように、高温超伝導バルク材⁶を、上部にドーナツ形状のネオジウム磁石を配したまま冷却して実現したもので、磁力線のピン止め効果の結果生じた現象である。ピン止め効果は、磁力線が存しない超伝導領域と磁力線に貫かれた正常領域の共存した状態で、磁力線がバルクの中で固定される現象である。この磁力線の様子を可視化したのが図8(a)で、大型ネオジウム磁石の上部に図7の超伝導体を置いたときの様子である。ドーナツ状に磁力線が貫いているのが分かる。ドーナツ形状のネオジウム磁石の磁力線が超伝導体に「移植」されたと解釈できるであろう。「移植」された磁力線が固定されるので、図7のような奇異な現象が生じるのである。図8(a)~(c)（動画は著者のWEBサイト⁵を参照）は液体窒素温度から室温になる過程で超伝導領域が消失する様子である。終状態は全ての領域が磁力線に貫かれており、バルク全体が正常状態になったことが分かる。

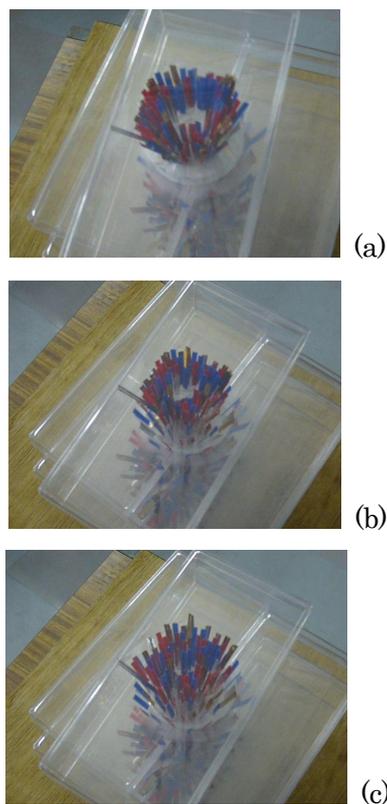


図8. ピン止め効果を示した高温超伝導バルク材が超伝導領域を消失する過程。(a)はピン止め効果を示した高温超伝導バルク材で、ドーナツ状の磁石の磁力線が「移植」されたことが分かる。室温雰囲気中で温まると、徐々に磁力線に貫かれる領域が増大し(b)、やがてバルク全体が磁力線に貫かれ、正常状態になる(c)。

4. 電磁気学の基本現象の観察

電磁誘導は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るものではない。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。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するものである。図9は2次元磁力線観察装置が磁力線を描き出した前面で、LEDを結線したコイル（23000巻き）を左右に動かしたときの様子である。図10は大型ネオジウム磁石⁷を回転させ、そのときの磁力線の変化とコイル（23000巻き）に結線したLEDの点灯を観察した様子である。いずれも閉回路内の磁束が変化するとき起電力が生じることが分かる。

電磁気学は磁気単極子の存在を否定したものであり、磁力線が空間のどこかで切断されることはない。すなわち磁力線は無遠方から無遠方へ伸びているか、閉曲

線のいずれかである。これを示す一例が図 11 で、磁力線が金槌の下部から吸い込まれ、上部から湧き出すのが分かる。

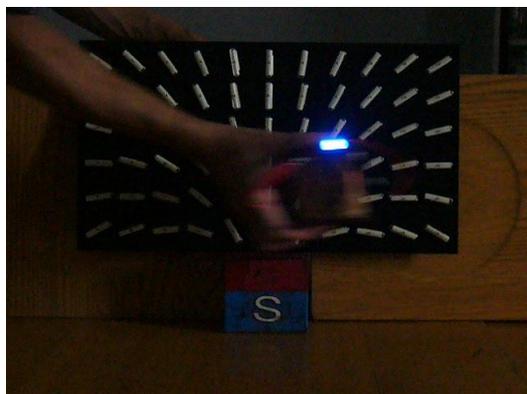


図 9. 2次元磁力線観察装置による電磁誘導の観察。コイルを左右に動かすとLEDが点灯する。コイルを貫く磁束の変化を想像させながらLEDの点灯を観察させることで、電磁誘導の本質へ導くことが可能。



図 10. 3次元磁力線観察装置による電磁誘導の観察。ネオジム磁石が回転するとコイルに結線されたLEDが点灯する。コイル内の磁束の変化とLEDの点灯とを同時に観察させることで、電磁誘導の本質へ導くことが可能。

これら電磁現象の演示の意義については6章で議論する。



図 11. 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。

5. 磁力線観察の展示化



図 12. 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、ビニールタイが磁力線を3次的に描く。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。

図 12 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が起電力の起源であることが観察できる。すなわち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。

6. 議論

磁力線観察の方法を2種類考案した。これらは取り扱いが簡単で現象を大きく見せるので効果的な教具である。100人を超える見学者を対象に演示可能である。また、超伝導現象や電磁気学の基本現象における磁力線が観察できる。科学館のサイエンスショーだけでなく、高等学校での出張授業でもきわめて好評である。3次的磁力線観察は展示化され、大阪市立科学館で公開されている。この展示は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。以下にこれらの成果について議論する。

超伝導現象の可視化

超伝導現象の演示は、図5のように磁石を反発する様子、図7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、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など、意外性のある現象で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。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侵入しない。」というマイスナー効果である³。この2つの特徴から上記の演示は考察されるべきであるが、それは見学者の知識や興味から乖離していることが多い。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6や図8が示すことが出来るようになったので、磁力線による考察が現実味を持って可能になった。たとえば、図5に関しては図6を示すことで、「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。また、図7に関しては図8を示し、「ピン止め効果により、磁石の磁力線が移植され、その磁力線が変化しないように超伝導体と磁石の間の距離が一定に保たれている。」と解説できる。少なくとも奇異な現象の背景には、超伝導体固有の磁力線の振る舞いがあることが分かるであろう。また、大学での講義にも次のように有効であろう。マイスナー効果は次のロンドン方程式を仮定して導かれるものである。

$$\text{rot } \mathbf{j} \propto -\mathbf{B} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{j} は電流密度、 \mathbf{B} は磁束密度である。これは超伝導体表面に侵入した磁束密度とこの表面部分に流れる電流との関係を与える。バルク表面に生じる渦電流が、外部の磁束が超伝導体内部に侵入するのを妨げる。超伝導体は完全導体であるため、この渦電流を保つための仕事は不要で、永久電流となる。このような反磁性電流をイメージさせながら、図6や図8の磁力線を観察させることは非常に教育的である。さらに、図7のような現象を磁力線のエネルギーミニマムから考察するのは大学初学年の演習問題にも有効で、初学者に演習の動機を強く与えると思われる。

なお、超伝導現象における磁力線観察は本稿以外の方法でさらによいものが可能かもしれない。より刺激的な超伝導現象の演示開発もよいが、本質に迫る磁力線観察の開発も期待したい。本稿のものがその発端になることを願う。

マクスウェル方程式の可視化

4章ではマクスウェル方程式のうちの2組の式に対応する演示を提示した。マクスウェル方程式は電磁現象を理解するための原理式で、次の4つの法則などを定式化したものである。

- ① 電磁誘導の法則
- ② アンペールの法則を電荷の保存則と両立するよう修正したもの
- ③ 電場におけるガウスの法則
- ④ 磁束の湧き出しが0（磁気単極子が存在しない）

したがって、これらそれぞれの法則に対応する演示は電磁気学の学習においてきわめて重要な意義を持つ。本稿で提示した演示は①と④に対応するものである。

電磁誘導は次式で定式化されるように、閉回路内の起電力 V の起源をそれを貫く磁束 ϕ_m の時間変化とするものである。

$$V = -d\phi_m/dt \quad (2)$$

これを局所化したのが次のマクスウェル方程式の一式

$$\text{rot } \mathbf{E} + \partial \mathbf{B} / \partial t = 0 \quad (3)$$

である。ここで、 \mathbf{E} は電場、 \mathbf{B} は磁束密度である。図9と図10による演示はこれらの基礎方程式を定性的に直接理解させるもので、電磁波の理解へも発展可能である。これまでの電磁誘導の演示は、磁石とコイルとの相対的運動による起電力を見せるのがほとんどであったが、それらは(2)式や(3)式の理解を与えるものではなく、電磁誘導の演示としては不十分である。また、電磁波の理解への発展も困難である。本稿の電磁誘導の演示は本質的な現象を見せるものである。

磁束の湧き出しが0（磁気単極子が存在しない）は次のマクスウェル方程式の一式で定式化される。

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

図11は金槌の一方から吸い込まれた磁力線が他方から湧き出しており、磁力線が金槌の中を通り抜けているというイメージを与える。すなわち、磁力線が切断されないという一例であり、(4)式を例示するものである。

物理学は各種公式によるショートカットで物理現象を容易に説明するが、教育現場では各種公式を基礎方程式から導く過程を軽視されることが多い。そのため、基礎方程式が根源的なものとして理解されず、各種公式と同列化されることが少なくない。図9～図11は(2)～(4)式の基礎方程式に対応するので、これらを電磁気学の導入部などで採用すれば、基礎方程式の理解だけでなく、電磁気学の体系的理解を促す一助にもなるであろう。

大型磁力線観察装置

本稿の磁力線観察装置は大阪市立科学館でのサイエ

ンスショーで用いるために開発されたもので、次の要件を満たす。

- ① 100 人を越える見学者が一同に観察できる。
- ② 鮮明な磁力線を描く。
- ③ 磁力線の時間的変化に対して瞬時に応答する。
- ④ 構造が単純・自明である。
- ⑤ 取り扱いが簡単。
- ⑥ 製作が容易で安価。

さらに、3次元観察は

- ⑦ 観察対象に対して装置の条件が可変

磁力線観察の方法は優れたものが多数開発されているが、上記の要件を全て満たすものはないであろう。学校現場や科学教室などでは有効であろうが、いずれもサイエンスショーには不向きである。例えば、透明の板に針金あるいは小磁石の入った小穴を多数組み込んだものは^{8,9}、個人あるいは少人数向きであり、多人数での観察はできないし、面倒な組立作業が必要である。オイルなどに鉄粉などを入れたものも多数あるが、いずれも少人数用であり、磁極に鉄粉が集中する、オイルの粘性で磁力線の変化に対して応答が緩慢、という難点がある。その他市販の教材も多数あるが、ほとんどが少人数用である。観察装置を投影して多人数に見せる方法があるが、直接的な観察でないので現実味に欠ける。多人数用の代表的なものはパリにある科学館、発見の宮殿のサイエンスショーであろう。これは2m長程度の巨大な板に10cm程度の鉄板を多数貼り付けた磁力線観察装置で大型電磁石による磁場を見せるもので、強烈な印象を与える。これをヒントに開発したのが本稿の2次元観察装置で、単純な工程で極めて安価に製作したものである。科学技術館の巡回展示物「マグネット展」の「立体磁力線観察キューブ」も多人数での観察が可能であろう。これは透明容器に市販の磁気プローブを多数組み込んだものである。メンテナンス性もよいと聞く。しかし、磁気プローブが高価なので安価な製作は不可能である。また、磁気プローブが容器に組み込まれているので、観察の自由度が高くない。本稿の3次元観察はプラスチック容器の大きさやその中に入れるビニールタイの密度や長さを自由に变化させることができるので、観察の自由度が極めて高い。資料の形状や磁場の状況に応じてこれらを調整することで、超伝導現象や電磁気現象における磁力線の振る舞いが観察できる。

この磁力線観察には大型ネオジウム磁石が必要である。大型ネオジウム磁石があれば、本稿で取り上げた現象はもちろん、それ以外にも様々な物理現象を演じることが出来る。すでに導入した高校も複数ある。多くの現場に普

及し、現象の本質に迫る演示が多くなされることを願う。

演示活動

サイエンスショーなどの演示活動では、見学者の興味を惹くためにより刺激的なものが求められる。見学者はその刺激だけで喜ぶので、演示者はその反応に短絡的に満足し、さらに刺激的な演示を求めることが少なくない。最近の演示活動には科学的考察よりも、このような刺激だけを希求するスパイラルのような流行を感じることもある。もちろん、見学者の興味をひきつけることは演示にとって重要な要件であるが、現象の本質に迫る演示も重要である。本稿の演示は見学者から感嘆の声があがり、かつ、現象の本質を見せる。そして、現象の本質を見た刺激や記憶が科学的考察を手助けするものである。超伝導現象における磁力線の可視化はおそらく初めてである。このように刺激を希求したものでなく、本質に迫る挑戦的な演示であることを強調したい。

謝辞

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 17,121 (2007)

<http://www.kita.osaka.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 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。

5 <http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~saito/>

6 新日本製鐵(株)の CuBaDyO 高温超伝導材

7 10×5×5cm のネオジウム磁石を回転できるようアクリルケースに封入したもの。

8 Exploratorium Cookbook II Recipe No.92

9 新倉節夫：平成元年東レ理科教育賞受賞作