

コイル周辺の条件が電磁誘導に与える影響

班員 家 一步希、小倉 功暉、中山 健斗、藤巻 和雅
担当教諭 山本 一博

キーワード：電磁誘導、誘導電流、電力量、透磁率、磁気遮蔽

In electromagnetic induction, we compared induced current and electrical energy by varying substances around a coil, the quantity, and the position. Iron outside the coil, copper, aluminum, and nickel didn't have any effect, while iron inside the coil made the induced current decline temporarily when the magnet was dropped, and so the electrical energy decreased. In addition, electrical energy decreased as the quantity of iron was increased and the iron was placed inside the coil more. However, the decrease was limited. As for the reason of the phenomenon, we considered that iron is a ferromagnet whose magnetic permeability is high and that magnetic shielding happened by iron.

1 はじめに

電磁誘導は、コイルを貫く磁束の変化によって、コイルに誘導起電力が生じる現象である。この電磁誘導は、発電機やIH調理器、非接触ICカードなどに利用されているが、その周囲には金属などのさまざまな物質が存在する。しかし、こうした物質が電磁誘導にどれだけ影響するかについての研究は少ない。そこで、電磁誘導において、コイルの周囲の条件が電磁誘導に及ぼす影響を明らかにすることを目的に本研究を行った。

2 方法

アクリルパイプ、容器、500巻きコイルを用いて、図1に示す実験装置を作製した。実験装置は、容器の中に配置した500巻きコイルの中をアクリルパイプが貫く構造になっており、棒磁石を同じ向きを保ったまま、コイルの中を確実に通過させることができる。ここで、コイルの周囲の条件を実験Ⅰ～Ⅲにおいて、それぞれ設定した。実験装置で、長さ10cmの棒磁石をコイル上面から75cmの高さからパイプの中に落下させ、コイルの中を通過させた。そのときにコイルに流れた誘導電流を、ワイヤレス電流セ



図1 実験装置

ンサ（島津理化）を用いて記録した。その後、記録した誘導電流の値から電力量を算出した。電力量の算出にあたり、電圧計で正確な電圧を測定することができなかったため、本研究では比較のためだけに用いるので、コイルの抵抗を1と定めて、 $(電力) = (電流)^2$ とし、台形積分法によって電力を時間で積分した。電力量に関しては、10回の平均を求めた。

3 実験

実験Ⅰ コイルの周囲の物質による影響

【方法】

【A-1】コイルの内側に5cmに切った鉄線195本（図2）、【A-2】コイルの外側に5cmに切った鉄線195本、コイルの内側に【B】5cmに切った銅線195本（図3）、【C】高さ5cmの50重にしたアルミホイル（図4）、【D】130巻きのニッケル線（図5）を置いた。



図2 【A-1】内側の鉄



図3 【B】内側の銅



図4 【C】内側のアルミ



図5 【D】内側のニッケル

【結果】

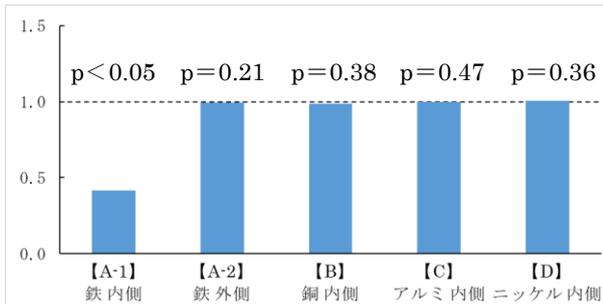


図6 なしの場合を1とした時の電力量の比率
(なしの場合とt検定、N=10)

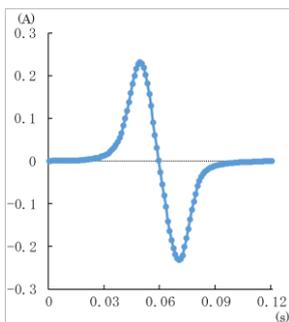


図7 鉄線がない場合の誘導電流の変化

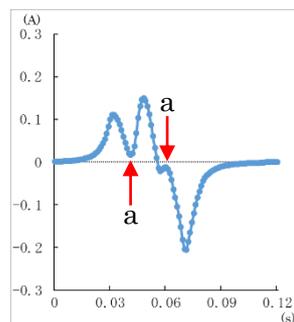


図8 コイル内に鉄線が存在する場合の誘導電流の変化

図6に示すように、コイルの内側に【B】銅、【C】アルミニウム、【D】ニッケルを置いた場合は、なしの場合とのt検定により、有意差はなかった。【A-1】コイルの内側に鉄を置いた場合は、電力量が半分程度に減少し、なしの場合とのt検定により、有意差があった。一方で、【A-2】コイルの外側に鉄を置いた場合は、電力量の減少は見られず、なしの場合とのt検定により、有意差はなかった。

磁石落下時の誘導電流の変化を比較すると、通常は図7のような変化を示すが、コイル内に鉄が存在する場合は、図8に示すように、誘導電流が流れ始めるタイミングが早くなり、その後、誘導電流の増加が一時的に抑えられ、減少する部分 (a) が見られた。

実験Ⅱ 鉄の量による影響の変化

【方法】

コイルの内側に置く5cmに切った鉄線の本数を0本から390本まで増やしていった。

【結果】

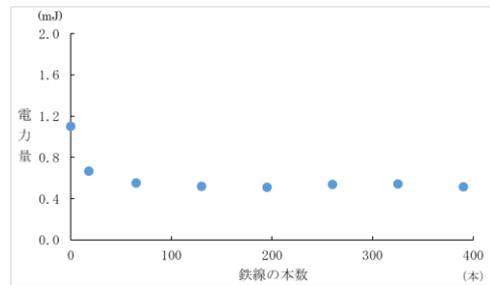


図9 鉄線の本数と電力量の関係

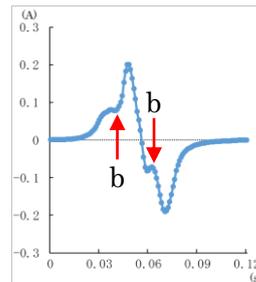


図10 鉄線18本の場合の誘導電流の変化

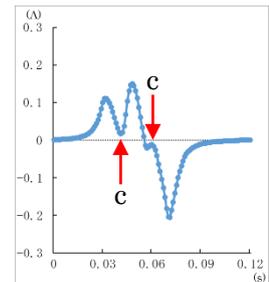


図11 鉄線65~390本の場合の誘導電流の変化

図9に示すように、電力量が鉄線0本の場合の半分程度になるまでは電力量が減少したが、それ以降は一定となった。また、磁石落下時の誘導電流の変化を比較すると、鉄線18本の場合 (図10) はあまり減少しなかった (b) のに対し、鉄線65~390本の場合 (図11) は大きく抑えられ、約0Aまで減少した (c)。これが0Aを下回るまで減少することはなかった。

実験Ⅲ 鉄の位置による影響の変化

【方法】

コイルの内側に置く長さ5cmの鉄線65本の上端の位置を、コイル上面を基準として、+8cmから-10cmまで、2cmずつパイプに沿って上下させた。

【結果】

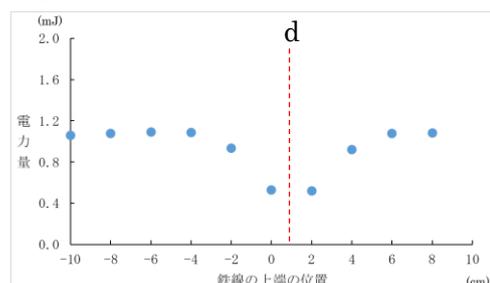


図12 鉄線の上端の位置と電力量の関係

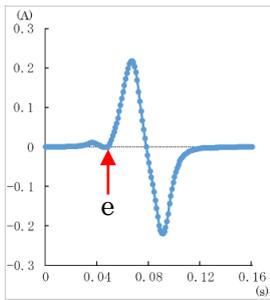


図 13
+8cm の場合の誘導電流
の変化

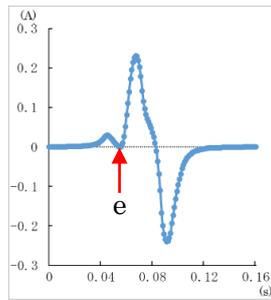


図 14
+6cm の場合の誘導電流
の変化

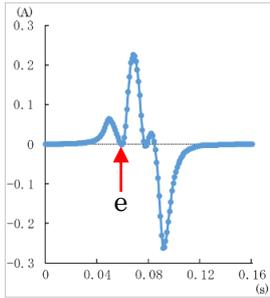


図 15
+4cm の場合の誘導電流
の変化

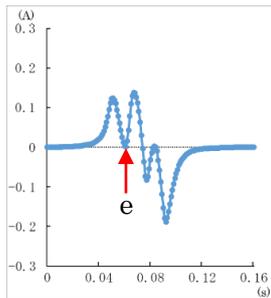


図 16
+2cm の場合の誘導電流
の変化

図12に示すように、鉄線の上端の位置が-4cm~0cm、および、+6cm~+2cmになるにかけて、電力量が半分程度に減少した。コイルの中心と鉄線の中心が一致する位置に鉄線が存在する場合 (d) に電力量が最も減少すると考えられる。また、図13~図16に示すように、磁石落下時の誘導電流の変化を比較すると、鉄がコイルに近づくにつれて、誘導電流が一時的に減少するタイミング (e) が移動し、その減少が急になった。この現象は、鉄線の上端の位置が負の場合にも見られた。

実験IV 磁束密度の変化の測定

【方法】

パイプの周囲に長さ5cmの鉄線を65本および130本置いた場合と置かない場合において、棒磁石につけた糸を約1cm/sで引き、棒磁石を下から上にパイプの中を通過させた。磁気センサーを搭載したスマートフォンを、鉄線の中心から真横に2.5cmの位置に磁気センサーがくるように置き、その時の鉄線の外側となる空間の磁束密度の変化をそれぞれ2回ずつ記録した。

【結果】

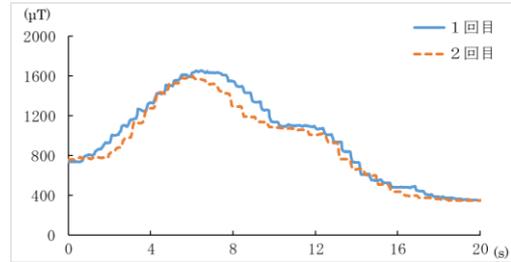


図 17 鉄線がない場合の磁束密度の変化

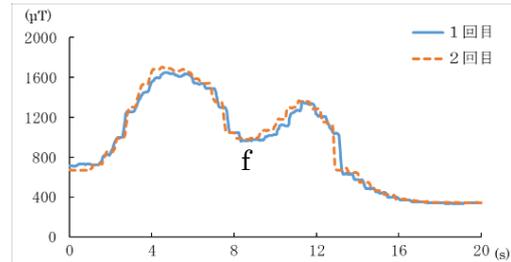


図 18 鉄線 65 本の場合の磁束密度の変化

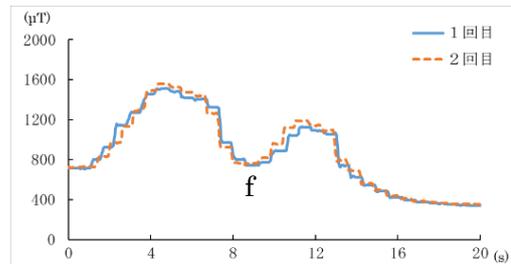


図 19 鉄線 130 本の場合の磁束密度の変化

鉄線なしの場合(図17)と鉄線ありの場合(図18、図19)を比較すると、磁石が鉄線の中心を通過したあたりで、鉄線ありの場合に磁束密度が一時的に減少する部分 (f) が見られた。また、鉄線65本の場合(図18)と130本の場合(図19)を比較すると、鉄線130本の場合の方がより低い値まで減少した。

4 考察

実験 I において、コイル内に鉄が存在する場合のみ影響が見られたのは、鉄が他の金属に比べて、特に透磁率が高く、強磁性体であることが考えられる。それぞれの物質の比透磁率は、銅が0.999990⁽¹⁾、アルミニウムが1.000021⁽¹⁾とほぼ1、ニッケルが100~600⁽²⁾であるのに対し、鉄は6000~8000⁽³⁾である。

実験 II において、電力量に下限が存在するのは、誘導電流が一時的に減少する際に0Aを下

回ることがないからだと考えられる。

また、実験Ⅲにおいて、鉄がコイルに近づくにつれて、誘導電流の一時的な減少が急になるため、その結果、電力量に対する影響が大きくなると考えられる。

実験Ⅰ～Ⅳを踏まえ、コイル内に鉄が存在する場合に見られた影響について、次の2段階に分けて考えた。

- ① 鉄によって磁束密度が大きくなり、誘導電流が流れ始めるタイミングが早くなったとともに、誘導電流が増加した。
- ② 鉄によって磁気遮蔽が起こった結果、誘導電流が一時的に減少した。

①の磁束密度の増加について考察する。磁束密度(\vec{B})は透磁率 μ と磁場 \vec{H} を用いて次式で与えられる。

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

また、磁束(Φ)はコイルの断面積 S を用いて次式で与えられる。

$$\Phi = BS$$

周囲の物質の透磁率が大きいと磁束密度が大きくなり、それに伴って、磁束も大きくなる。そのため、磁束の変化も大きくなり、誘導起電力および誘導電流が増加すると考えられる。

次に、②の磁気遮蔽について考察する。実験Ⅳにおいて、鉄が存在する場合には、磁束密度が誘導電流の変化と同じように一時的に減少することが確認できた。磁束密度が減少したことから、磁束が妨げられたと考えられる。また、鉄がコイル内に存在する場合の電力の値から鉄が存在しない場合の電力の値を引いた値は、図20に示すような波形となり、鉄線を貫く磁束の変化から予想される電力変化の波形とほぼ一致している。また、図20の矢印 g が示す、磁束の変化が妨げられ始めてから誘導電流の正負が入れ替わるまでの時間0.02秒、磁石の落下速度3.8m/sより、その間の磁石の移動距離は7.6cmとなる。これは、磁石の下端が鉄線の上端を通過してから、磁石の中心が鉄線の中心を通過するまでの磁石の移動距離とほぼ一致す

る。これらのことより、磁気遮蔽が起こったと考えられる。

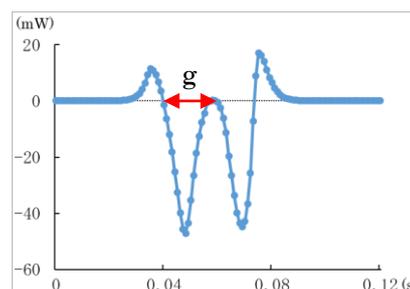


図 20
(鉄ありの電力) - (鉄なしの電力) の値

実験Ⅰにおいて、コイルの外側に鉄が存在する場合に影響が見られなかったのは、鉄がコイル内になかったため、磁気遮蔽が起こらず、磁束が妨げられなかったからであり、また、実験Ⅱにおいて、鉄線の本数を増やしても電力量が変化しなかったのは、鉄線65本の時点で磁束がほぼ完全に妨げられたからだと考えられる。

電磁誘導はIH調理器に利用されている。IH調理器で鉄およびステンレス製の鍋を使用すると、磁気を鍋に閉じ込めやすいという利点もあると考えられる。磁気を鍋に閉じ込めやすいと、渦電流が多く発生し、効率よく温めることが可能である。

5 まとめ

鉄は、透磁率が高い強磁性体である。そのため、電磁誘導において、コイル内に鉄が存在する場合には、鉄の量がより多く、コイルのより内部にあるとき、磁気遮蔽によって誘導電流が減少し、それにつれて電力量も減少するが、下限が存在する。

6 参考文献

- (1) 國友正和. 改訂版総合物理2 ー波・電気と磁気・原子ー. 数研出版株式会社. 2020
- (2) フランク・B・ギブニー. ブリタニカ国際百科事典15. 株式会社ティービーエス・ブリタニカ. 1974
- (3) 国立天文台. 理科年表 平成28年度. 丸善出版株式会社. 2015