

<p>磁石をコイルに近づけると...</p> <p>右手親指則</p>	<p>レポート</p> <p><b>核融合への手引き (4)</b></p> <p><b>(続)電磁気学を思い出しましょう</b></p> <p>SCE・Net 郷 茂夫</p>	<p>R-83</p> <p>発行日： 2022年 9月12日</p>
-------------------------------------	---	---

(左上枠のイラストは、電磁誘導の右手親指の法則です。)  
(見出し番号は、前回「その(3)「電磁気学を思い出しましょう」」の続きです。)  
(略号、原子核の表示方法は、その(1)の<使用する略号>に定めたとおりでゆきます。)  
(電磁気学、力学のベクトルの物理記号の表示方法；その(3)で定めた字体を使用します。)

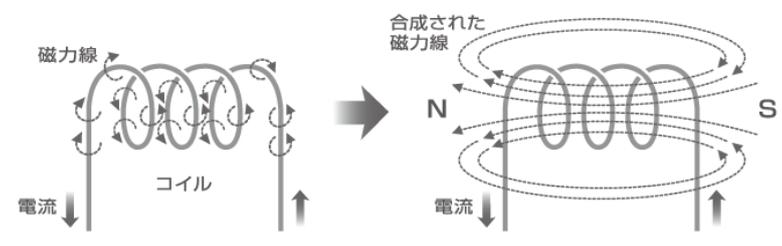
今回の分割レポート (4)は、前レポートの続きです (5頁制限で分割したもの)。

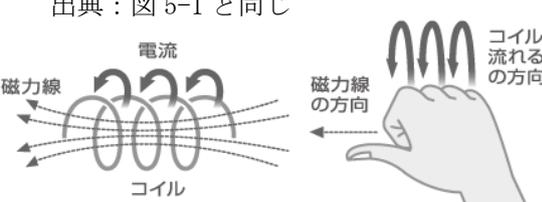
## 5. 電場と磁場の電磁気学の復習 (電流と磁束の関係)

5章では、核融合に特に関係する用語、文節には太字、下線を施しているので留意下さい。

### 5-1 電流の磁気作用＝電流が磁束を造るということ

<p>電流の磁気作用とコイルにおける磁気作用<sup>1)</sup></p>	<p>導線に電流を流すと磁界をつくり、周囲に磁気作用を及ぼす。また、コイル状の巻き銅線に電流を流す場合も磁気作用を及ぼす。</p> <p>&lt;電流がつくる磁界と右ねじの法則&gt;  磁力線の方向は<b>右ねじの法則</b>で決まる。すなわち、右ねじの進む方向と回転方向は、それぞれ電流方向と磁力線の方向となる。</p> <p>図 5-1. 電流がつくる磁界と右ねじの法則  出典：<a href="#">インダクタ (コイル) の基礎知識①   エレクトロニクス入門   TDK Techno Magazine</a></p> <p>&lt;平行導線に加わる力&gt;  平行導線に流れる電流が同方向の場合、導線の間には<b>吸引力</b>が作用し、逆方向の場合は<b>反発力</b>が作用する。</p> <p>図 5-2. 平行導線に加わる力、 出典：図 5-1 と同じ</p>
---	---

<p>(コイル) 空芯の電磁石<sup>1)</sup></p> <p>合成された 磁力線<sup>1)</sup></p>	<p>&lt; <u>コイルと磁力線</u> &gt;</p> <p>コイルに電流を流すと、磁力線が合成されて、コイル内側を貫通するようになる。鉄などの磁性体を芯に入れる電磁石はこの原理による。</p>  <p><b>ポイント</b> 電流の流れるコイルは、空芯の電磁石と同等である。</p> <p>図 5-3. コイルと磁力線, 出典: 図 5-1 と同じ</p>
--	---

<p>上記をまとめて、<u>右手親指の法則</u>と呼ぶ<sup>1)</sup></p>	<p><b>ポイント</b></p> <p>右手の親指方向に電流が流れるとき、他の4指の方向が磁力線の方向となる(右ねじの法則と同じ)。</p>  <p>図 5-4. 右手親指の法則, 出典: 図 5-1 と同じ</p> <p><b>ポイント</b></p> <p>右手の4指の向きがコイルに流れる電流方向とすると、親指方向が磁力線の方向となる。</p> 
---	---

<p>無限長ソレノイドコイルの内部磁界<sup>2)</sup></p> <p>有限長のソレノイド磁界</p>	<p>ソレノイド(コイル)とは、円筒に螺旋状に密に巻いたコイルのことである。図 5-5 は鉄心に巻いているが、鉄心が無くてもソレノイドである。このソレノイドの長さが無限長 (<math>l=\infty</math>)だと仮定すると、ソレノイドに流れる電流により発生する磁界はソレノイド内部だけに存在することになる。</p> <p>しかし、図 5-5 のように<u>コイルが有限長ならば、その外側の磁界は発散して、図 5-3 のごとく周囲に拡がる。</u></p>
---	--

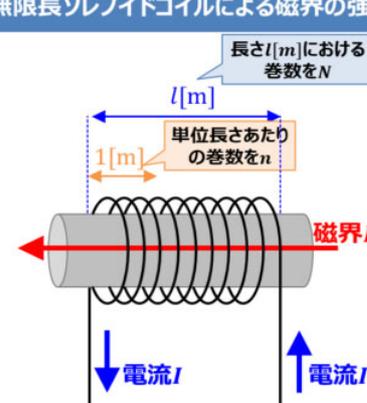
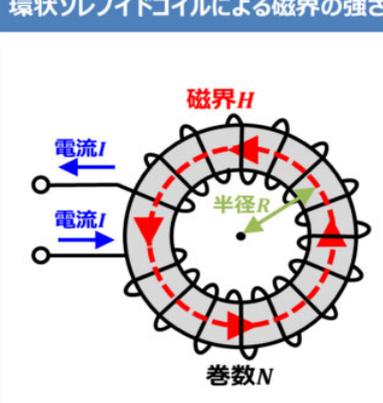
<p>無限長ソレノイドコイルによる磁界の強さ</p>  <p>長さ <math>l[m]</math> における巻数を <math>N</math></p> <p>単位長さあたりの巻数を <math>n</math></p> <p>磁界 <math>H</math></p> <p>電流 <math>I</math></p> <p><math display="block">H = nI = \frac{NI}{l}</math></p>	<p>環状ソレノイドコイルによる磁界の強さ</p>  <p>磁界 <math>H</math></p> <p>電流 <math>I</math></p> <p>半径 <math>R</math></p> <p>巻数 <math>N</math></p> <p><math display="block">H = \frac{NI}{2\pi R}</math></p>
---	--

図 5-5. 無限長ソレノイドの内部磁界 / 図 5-6 環状ソレノイドの内部磁界

	出典： <a href="#">【磁界の強さのまとめ】『直流導体』・『円形コイル』・『無限長ソレノイド』・『環状ソレノイド』 (detail-infomation.com)</a>
<b>環状ソレノイドの内部磁界</b> 2)	ソレノイドを図 5-6 のように環状(ドーナツ輪のような形)にしたソレノイドのことを環状ソレノイドと呼ぶ。環状ソレノイドに流れる電流により発生する磁界は環状ソレノイド内部に発生し周回する。

## 5-2 電磁誘導＝磁束の変化が電流を発生するということ (5-1 の逆)

注意：上述の「5-1 電流の磁気作用」は、電流が流れている限り磁力は発生するということ。しかし、本節「5-2 電磁誘導」(磁力線が電流を発生させるという逆現象)は、磁力線が「変化する間だけ」電流が発生するということ。	
ファラデーの法則 <sup>3), 4), 8)</sup>	<p>&lt;ファラデーの法則&gt;</p> <p>磁束変化が起電力(=電流を流す能力)を発生するという「電磁誘導(electromagnetic induction)」現象が、1831年ファラデーによって発見された。起電力を発生するのは、磁束が変化する場合であること；磁束一定(変化なし)の状態では誘導起電力は発生しないこと。</p>
電磁誘導 <sup>2), 5)</sup>	<p>上述の現象のことを「電磁誘導」といい、この時生じた電流のことを「誘導電流」と言う。また、この時コイルには電流を流す元となった「誘導起電力」が生じている。</p> <p>閉回路を貫く磁束 <math>\phi</math> が変化するとき、その閉回路に生じる起電力の大きさ <math> V_{emf} </math> は、</p> $ V_{emf}  =  d\phi/dt  \quad (*) \text{ となる (ファラデーの法則の公式) .} \quad (5-1)$ <p>(*) <math>   </math> は絶対値で、<math>+/-</math>の符号(起電力の方向)を外したもの。 つまり、磁束の時間変化が無いならば、<math> V_{emf} </math> はゼロである。</p>
レンツの法則 <sup>3), 4), 8)</sup>	<p>&lt;レンツの法則&gt;</p> <p>誘導電流は、磁束変化あるいは電流変化を阻止して、元の状態を維持する方向に流れるという法則である。反作用の法則とも呼ばれる。</p>
インダクタンス(誘導係数) <sup>5)</sup>	<p>ある回路を貫く磁束とその磁束を生じさせている電流との比をいう。電磁誘導は鎖交磁束の時間変化によって起こる。また、電流とそれによってできる磁場は比例関係にあるので、自己・相互誘導を調べるには、磁場を起こす電流 <math>I</math> [A] と誘導の起こる回路との鎖交磁束 <math>\Phi</math> [Wb] との比例係数があれば分かる。この比例係数をインダクタンスと呼び、磁束をつくる当該回路中の電流とのインダクタンスを自己インダクタンス、他の回路中の電流とのインダクタンスを相互インダクタンスと呼ぶ。</p> $\Phi_0(t) = L_0 * I(t) \quad (5-2)$
単位	インダクタンスの単位はヘンリー (henry) H と表記される。
鎖交磁束とは <sup>9)</sup>	鎖交磁束は、1回巻きのコイルに生じる物理的な磁束 $\phi(t)$ にコイルの巻き数 $n$ をかけたものなので、 $\phi(t)$ とは対照的に、実効的な磁束と言える。
自己インダクタンス <sup>1)</sup>	<p>単独のコイルでも電磁誘導現象が起こる。コイルに流れる電流が変化すると、発生する磁束も変化して、コイルに起電力が発生する。</p> <p>この場合、式(5-2)の比例係数 <math>L_0</math> を自己インダクタンスと言う。</p>

<p><b>相互インダクタンス； 相互誘導</b><sup>4)</sup></p>	<p>ある回路の電流変化によって他の回路に生じる起電力の大きさを表わす量。単位はヘンリー(H)。相互誘導係数ともいう。</p> <p>図5-7のように、コイルの1次側に交流電圧（電流方向が逐次変化する）を供給すると磁束が発生する。2次側ではこの磁束を打ち消すように誘導起電力が発生する。この相互誘導は、AC変圧回路（トランス）、携帯やパソコンのACアダプター、非接触の充電器、非接触カード（Suica Taspo など）等に多用されているが、<u>核融合のトカマクで見ると、1次コイルが中心のソレノイドコイルで、2次コイルがドーナツ内の導電性のあるプラズマと考えることができる。</u></p> <div data-bbox="826 212 1380 504" data-label="Diagram"> </div> <p>図5-7. 相互誘導／対面する1次コイルと2次コイル 出典：<a href="#">電磁誘導方式とは？   ワイヤレス給電とは？   エレクトロニクス豆知識   ローム株式会社 - ROHM Semiconductor</a></p>
<p>コイルの設計とインダクタンス<sup>1)</sup></p>	<p>コイルのインダクタンスはコイルの形状によって変わる。たとえば、ソレノイドコイル(単層)のインダクタンスは、以下の式で求められる。</p> <p>&lt;ソレノイドコイルのインダクタンス&gt;</p> <div data-bbox="475 1115 1356 1377" data-label="Equation-Block"> <math display="block">L = \frac{k\mu SN^2}{l} \text{ [H]}</math> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><math>L</math>: インダクタンス[H]    <math>N</math>: 巻数</p> <p><math>k</math>: 長岡係数            <math>S</math>: コイルの断面積[m<sup>2</sup>]</p> <p><math>\mu</math>: 透磁率[H/m]        <math>l</math>: コイル長[m]</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>巻数Nのソレノイドコイル(単層)</p> </div> </div> </div> <p>図5-8. ソレノイドコイルのインダクタンス，出典：図5-1と同じ</p>
<p>インダクタンスを大きくする基本手法<sup>1)</sup></p>	<p>上式より、コイルのインダクタンスは、同じコイル長なら、断面積が大きいほど、巻数が多いほど、大きくなるのがわかる。また、同じインダクタンス値なら、透磁率の高い磁性体をコア(磁心)とすることで、空心コイルより格段にインダクタンスを大きくすることができる。</p>

+

### 5-3 まとめ (磁場を造る／電場を造る)

既に説明したことですが、**核融合プラズマ制御の基本的手段**となるのでまとめです。

<p><b>磁場を造る</b></p>	<p>コイルに電流を通じれば、コイルの中(内側)に磁場ができる。電流を流している限り、磁場は維持される。</p>
<p><b>電場を造る</b></p>	<p>電磁誘導；磁束変化(増／減している間のみ)が起電力を生じる。磁束の内側に導電体があれば電流が流れるということ。但し、磁束が一定で変化しないならば電流は流れない。</p> <p>ということは、コイルに直流を通電始めてからフル電流になるまでのある時</p>

	間しか電流を造れないということであり、その後をどうするのか？
→ 後日の話だが、核融合プラズマでは「自発電流」という不可思議なものが出てくる。	

## 文献

- 1) [インダクタ \(コイル\) の基礎知識① | エレクトロニクス入門 | TDK Techno Magazine](#)
- 2) [【磁界の強さのまとめ】『直流導体』・『円形コイル』・『無限長ソレノイド』・『環状ソレノイド』 \(detail-infomation.com\)](#)
- 3) [電磁誘導の法則まとめ \(原理・ファラデー則・コイル\) | 理系ラボ \(rikeilabo.com\)](#)
- 4) [ファラデーの法則、レンツの法則とは？ 3つの違いをまとめ！ - 電気の泉 \(electricityprofessional.com\)](#)
- 5) [sin.eps \(uec.ac.jp\)](#)
- 6) [電磁誘導方式とは？ | ワイヤレス給電とは？ | エレクトロニクス豆知識 | ローム株式会社 - ROHM Semiconductor](#)
- 7) [Microsoft PowerPoint - 03.磁気 \(hokudai.ac.jp\)](#)
- 8) [ファラデーの法則・レンツの法則 | 電気☆入門 \(denki-nyumon.com\)](#)
- 9) [鎖交磁束と自己インダクタンス【電気回路】 \[例題つき\] - 大学の知識で学ぶ電気電子工学 \(daigakudenki.com\)](#)

その(4) 以上