

	<p>レポート</p> <p>核融合への手引き (5)</p> <p>荷電粒子の電場、磁場中での運動</p> <p>SCE・Net 郷 茂夫</p>	<p>R-84</p> <p>発行日： 2022年 9月12日</p>
---	--	---

(左上枠のイラストは、有名なフレミングの左手の法則です。思い出されましたか?)
(見出し番号は、前回その(4)「(続) 電磁気学を思い出しましょう」のつづきです.)
(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(5)は、電磁場中でのプラズマの動きの理解の基礎になる「荷電粒子の電場、磁場中での運動」についてです。ここは単一荷電粒子の挙動についてであり、プラズマのような荷電粒子群の運動とはちょっと違う面がありますが重要な基礎です。これは高校物理でも部分的には勉強していますが、大学講義用補助資料を使い復習もかねて整理します。

6. 荷電粒子の電場、磁場中での運動

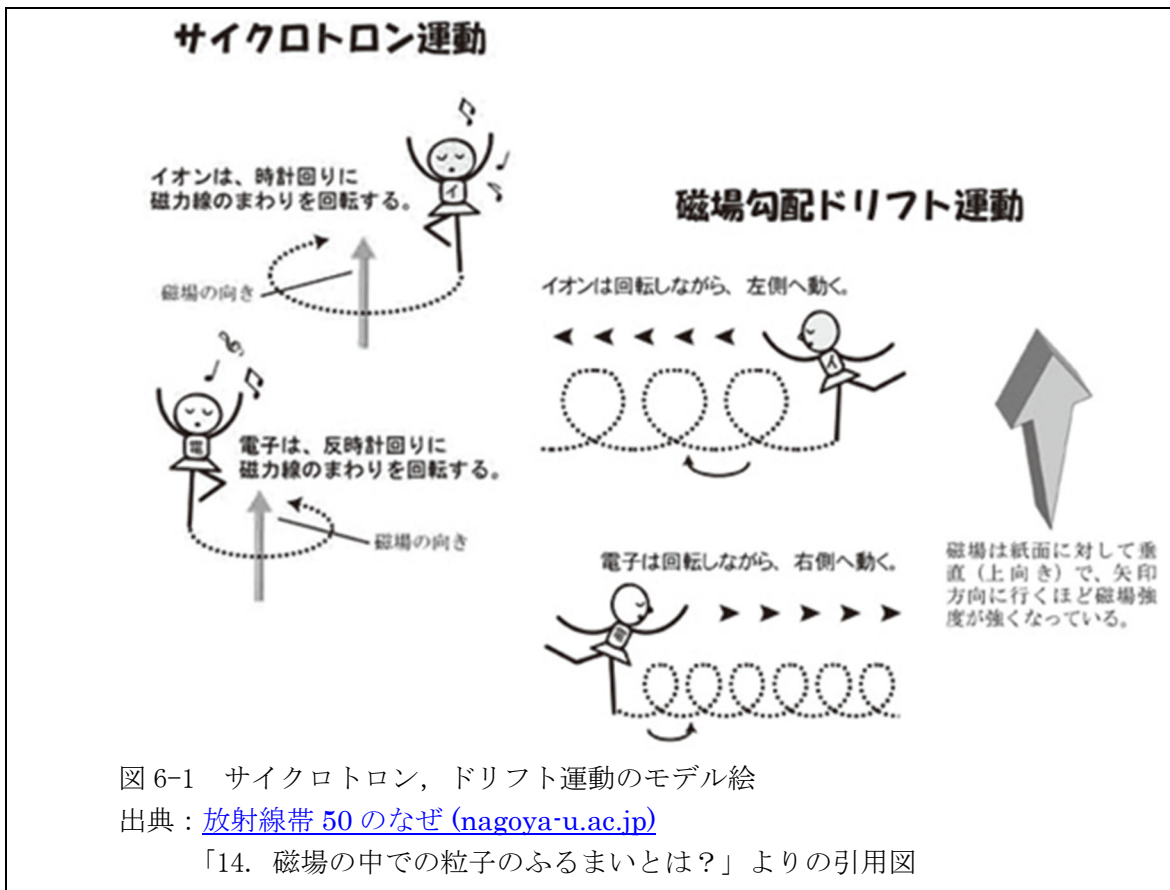
基本前提：ここで扱う「荷電粒子」は単一の荷電粒子（電子又はイオン）の電場、磁場中での運動や挙動です。後日扱うメイン主題の「プラズマ」は荷電粒子の集団であり、集団の挙動は単一粒子のそれとは異なる部分も出てきますので留意ください。

6章でも、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。

6-1 磁場中での荷電粒子の振る舞いのいろいろ（電場中は単純で後回し）

はじめにじっくりと荷電粒子の振る舞いにはどんなものがあるかを眺めましょう。

<p>サイクロトロン運動、ドリフト運動など¹⁾</p>	<p>磁場の中に荷電粒子を置くと、ローレンツカという力か働き、運動を始めると。このとき、粒子は磁力線に巻き付くように運動する（サイクロトロン運動という）。</p> <p>磁場の強さが一様ではない場合は、粒子は磁場の強さの変化によっても運動する（磁場勾配ドリフト運動という）。さらに、磁力線がカーブしている（曲率を持っている）場合は、このカーブの変化の度合いによっても運動する（磁場曲率ドリフト運動という）などがある。</p> <p>そして、回転方向や移動方向が電荷+/- によって異なる場合もある。</p> <p><u>サイクロトロン運動、磁場勾配ドリフト運動、磁場曲率ドリフト運動は、磁場の中にいる荷電粒子が示す代表的な運動パターン</u>である。</p> <p>下の図 6-1 に、サイクロトロン、ドリフト運動のモデル絵を示す。</p> <p>ここで、磁場 B は、矢印 \uparrow 方向であること、先太り \uparrow は磁場強度を示す。ちなみにドリフトというのは、「漂う」という言味である。</p>
--	---



6-2 要点まとめ（文章のみ，数式を使わず）

今回は数式を多く使いますので，始めに本レポートの要点を文章でまとめておきます。

<p>電場中の荷電粒子の運動</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 電場中にある荷電粒子にはクーロン力が働き，電場の方向に沿って移動する。プラスとマイナス荷電粒子は反対方向に移動する。 ● 電場の強さが一樣ならば，荷電粒子は等加速度運動をし，粒子の速度はどんどん早くなる。 ● 荷電粒子に力が働いて移動するので，電場は荷電粒子に対して仕事（エネルギー供給のこと）をする。この電場による仕事量は、巨視的に見ると粒子群のジュール熱に相当する（粒子群の温度が上がること）。 <p>（粒子群の場合のコメント：荷電粒子が群として密集している場合，荷電粒子の運動方向はまっすぐではなく衝突により複雑なジグザグになる。）</p>
<p>磁場中の荷電粒子； 磁場に入射した荷電粒子の運動^{2), 3), 4)}</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 一樣な磁場があり，その中に荷電粒子が任意方向から放り込まれ場合；磁場中で荷電粒子はローレンツ力を受けて運動する。その運動の方向はフレミングの左手の法則（図 6-2）にのっとりた方向である。 <p>粒子の速度の向きと，電荷 +/- と電流の向きを混同しないように注意。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 初速ゼロの場合，荷電粒子の軌道は必ず円になり，磁場に直角面方向に回り元の位置に戻ってくる（図 6-3）。この運動をサイクロトロン運動と言う。 <p>つまり，荷電粒子は磁束にくるくる巻き付く運動をすることになる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● イオンと電子は逆回りに円運動をする。 ● 円運動の中心が進む速度，方向は初速だけで決まる。

	<ul style="list-style-type: none"> ● サイクロトロン運動で、磁場方向速度がない場合、同じ位置で等速円運動する。磁場方向速度がある場合、その初速を保ちながら等速円運動をする。すなわち、らせん（螺旋）運動（図 6-4）である。 ● サイクロトロン運動の半径は磁束の強さが大きいほど小さい。 ● 荷電粒子にローレンツ力が働くが移動しない（初速には無関係）ので、磁場は荷電粒子に対して仕事（エネルギー供給のこと）をしない。 (なお、荷電粒子が弱い（磁束密度 B が小さいこと）磁束から強い磁束に「吸収される」ということは起こらないので留意.)
仕事の有無	エネルギー授受については、レポートその(8)で述べる。
一様な電場、 磁場中の荷電 粒子の運動 ^{3), 4), 5)} ドリフト運動	<ul style="list-style-type: none"> ● 荷電粒子はクーロン力とローレンツ力（狭義の）の両方の力を受ける。 ● 電場方向には、等加速度運動をする。一様な電場では、電子とイオンは逆方向に移動する。 ● 磁場に垂直な面で円運動をする（前節と同様なサイクロトロン運動；図 6-2, 図 6-3）。 つまり、荷電粒子は磁束にくるくる巻き付く運動をする。 ● イオンと電子は磁束の周りに逆回り方向に円運動をする。 ● サイクロトロン中心の運動のことを一般にドリフトといい、磁場と電場との共存状況によるドリフトを $E \times B$ ドリフト（イークロスビー= ドリフト）と呼ぶ。$E \times B$ ドリフトは、粒子の電荷の正負に依存せず同じ方向であることがおもしろい³⁾。つまり、ここでは電荷分離は起こらない。 (上記で「おもしろい」と言っている意味は、一様な磁場ならドリフト運動は同方向であるが、6-3 に示すように、磁場の条件が不均一になるとドリフトは $+/-$ で反対方向になるからであり、やや直感的ではないことを指している.) ● このドリフトの方向は磁場に直角である。

図 6-2 フレミングの左手の法則
 出典：[【ローレンツ力のまとめ】『向き』・『公式』・『円運動』などを解説！（detail-infomation.com）](#)

粒子の速度の向きと、
 電荷 $+/-$ と
 電流の向き
 を混同しないように注意。

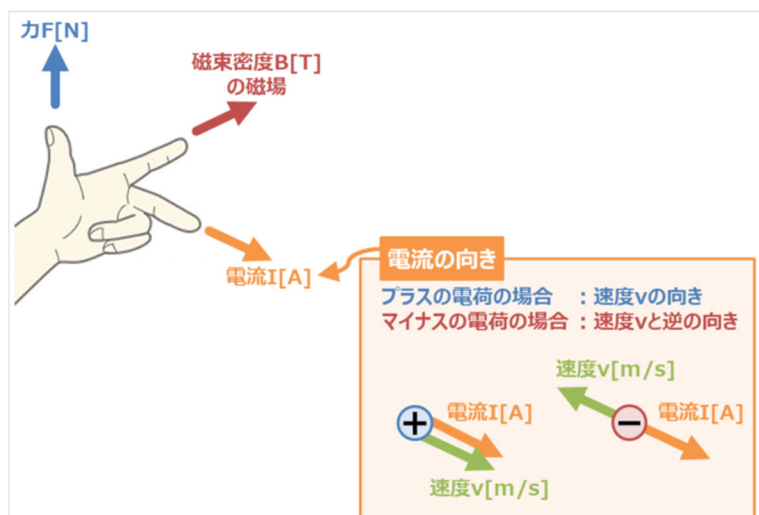
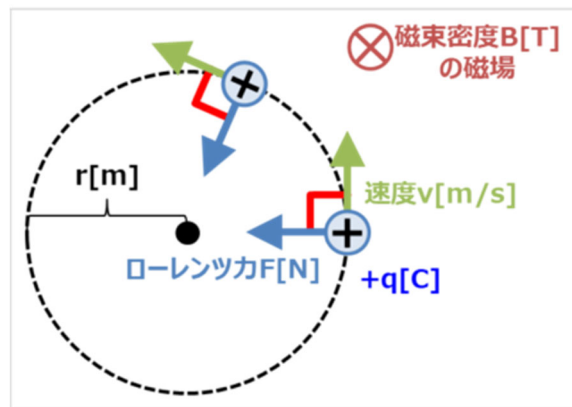


図 6-3 ローレンツ力による
荷電粒子の円運動

出典：図 6-2 と同じ。
磁束は紙面の垂直方向で表から裏に
向かっている (⊗印).



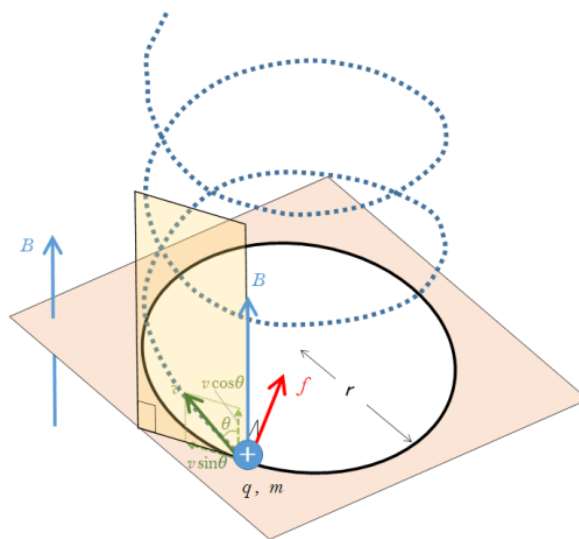
荷電粒子は常に速度の向きと垂直な向きに、かつ中心に向かう方向にローレンツ力 F を受ける。そのため、速度の移動に従ってローレンツ力の向きも変わる。その過程が繰り返され、円運動を行う²⁾。

図 6-4 らせん運動

出典：[ローレンツ力を受ける荷電粒子の運動 | KoKo 物理 \(kokolainen.com\)](http://kokolainen.com)

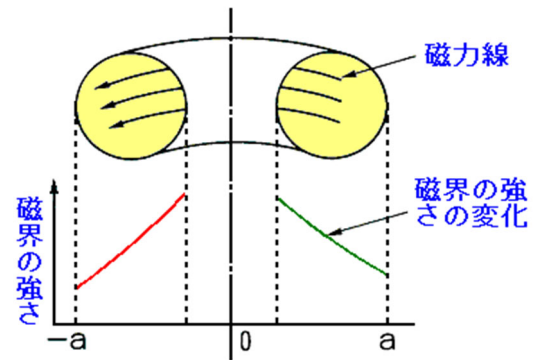
荷電粒子が磁場に斜めの速さに進入した場合；磁場に垂直な方向にはローレンツ力を受けることになるが、磁場と平行な方向には力はいかからない。磁場に垂直な方向では、上述のように円運動をするが、磁場の平行な方向にはそのまま等速運動をする²⁾。ということは、螺旋（らせん）運動をすることになる。

(注) うすくて見にくいですが、 $v \cdot \sin \theta$ 、 $v \cdot \cos \theta$ というのが接線面での粒子速度の分解ベクトルを表す。

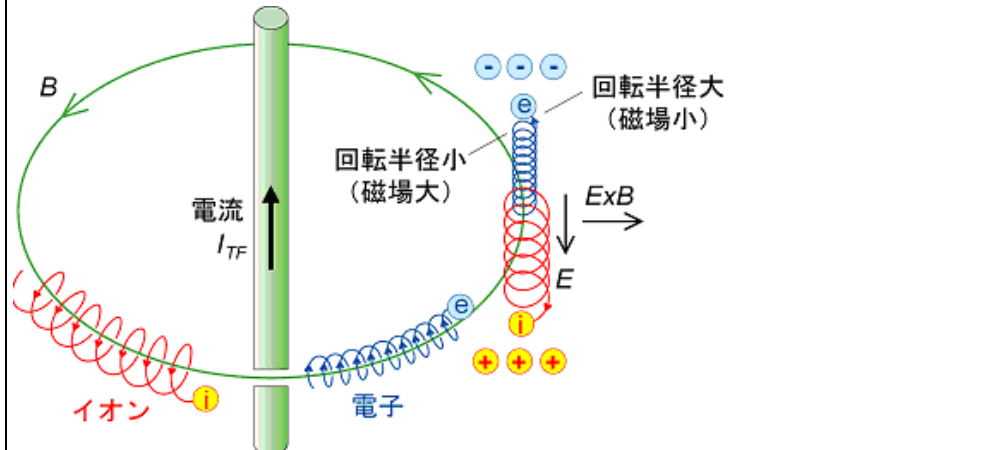


6-3 ドリフト運動

<p>(補足) ドリフト運動</p>	<p>荷電粒子のドリフト運動には、いろいろな条件の種類があることを、図 6-1 でアバウトに述べた。ここではもう少し立ち入って解説する。</p>
<p>電子とイオンが逆向きにドリフトする場合</p>	<p>磁束周りの荷電粒子のらせん運動の中心に、外部から遠心力がかかっている場合に、荷電粒子の回転中心がずれて移動するというのがドリフト現象のことである⁹⁾。ここで言う遠心力とはドーナツ閉空間内に沿った円運動によるものであり、荷電粒子のらせん運動の遠心力を言うのではない。つまり、ドリフト現象は、磁場が不均一の場合に起きる⁹⁾。</p>
	<p>トカマクの場合、磁場の不均一はドーナツ状に磁束が閉じていること、および磁場勾配があることが原因である。コイル内側（プラズマ部分）の磁場の強さ（磁束密度）は、ドーナツ（トーラス）中心に近いほど強くなり、外側に行くほど弱くなる。⁶⁾ 磁場勾配の分布の図 6-5 を参照のこと。この磁場の分布がドリフトを生み出す。これが、ドーナツ状ではなく、無限長のコイルであれば、磁場の不均一はなく、ドリフト現象は起きない⁹⁾。</p>

	<p>ここで注意してほしいのは、<u>荷電粒子のドリフトの方向は、ドーナツ外への遠心力の方向ではなく、上下方向（磁場と垂直方向）である。電子とイオンは電荷の符号が違うので、ドリフトする方向が逆⁴⁾になる。</u></p> <p>そのために、ドーナツ輪の上下で反対方向に電子とイオンが集まり⁸⁾、強い電場が発生する。この電場と磁場が粒子にローレンツ力を与え、電子もイオンも遠心力と同じ外向きに力が働く。</p> <p>この問題を解決するには、<u>発生する電場を消すことが必要で、磁力線を振る（ねじる）、つまり荷電粒子を周回させることで、ショートさせて消してしまうことである⁹⁾。</u></p> <p>この考え方がトカマクにおける「磁場閉じ込め」においても適用される。</p>	 <p>図 6-5 トーラス断面での磁界強度の変化 出典：ヘリカル型核融合装置の研究開発 (07-05-01-08) - ATOMICA - (jaea.go.jp)</p>
--	---	---

6-4 サイクロトロン運動とドリフト運動の直感的に分かり易い絵

<p>トカマク・プラズマとの関連説明</p>	<p>ここにサイクロトロン運動とドリフト運動についての直感的に分かり易い絵を示す（図 6-6）。真ん中の導線に電流を通じると周回する磁束ができることは、レポートその(3)で示した。この空間に荷電粒子（イオンと電子）が存在すると、それらは磁束に巻き付くとともに、<u>6-1 解説のように、磁束面直角な磁場曲率ドリフト運動（実際には、磁場勾配ドリフト運動も）を起こし上下に移動し、図のごとく +/- 電荷が分離してしまう。</u></p> <p>後日の主題であるが、<u>このような粒子の動きは核融合トカマク・プラズマにとって不都合であり、それを制御することがトカマクの重要目標である。</u></p>
<p>磁束に巻き付く荷電粒子とそれが<u>上下に移動するドリフト運動が核融合トカマク・プラズマ内でも起こる</u>⁸⁾</p>	 <p>図 6-6 単純トーラス磁場中でのイオンと電子の振る舞い 出典：「イメージング計測が解明した核融合プラズマの謎」・SCI(サイ)シンポジウム準備ページ (digitalmuseum.jp) より図 2 引用</p>

文献

- 1) [放射線帯 50 のなぜ \(nagoya-u.ac.jp\)](http://nagoya-u.ac.jp) 14. 磁場の中での粒子のふるまいとは？
- 2) [【ローレンツ力のまとめ】『向き』・『公式』・『円運動』などを解説！ \(detail-
infomation.com\)](http://detail-
infomation.com)
- 3) [Ch01.pdf \(t-shirafuji.jp\)](http://t-shirafuji.jp) , 第1章 荷電粒子の運動
- 4) [appendix1.pdf \(kyoto-u.ac.jp\)](http://kyoto-u.ac.jp) , 解説：荷電粒子の運動（速度と電磁場の相互作用）
- 5) [particlemotion_v0.pdf \(u-tokyo.ac.jp\)](http://u-tokyo.ac.jp) , 荷電粒子の運動
- 6) [ヘリカル型核融合装置の研究開発 \(07-05-01-08\) - ATOMICA - \(jaea.go.jp\)](http://jaea.go.jp)
- 7) [荷電粒子に働く力 \(kogakuin.ac.jp\)](http://kogakuin.ac.jp)
- 8) [「イメージング計測が解明した核融合プラズマの謎」 - SCI\(サイ\)シンポジウム準備ページ \(digitalmuseum.jp\)](http://digitalmuseum.jp)
- 9) 公開講座講師：高畑一也先生（核融合科学研究所 (NIFS), ヘリカル研究部）との私信による。

その(5) 以上