# 磁界中プラズマの集団運動

## ーー　F x B ドリフトの応用例

## （a）平板上プラズマの運動　(その1)

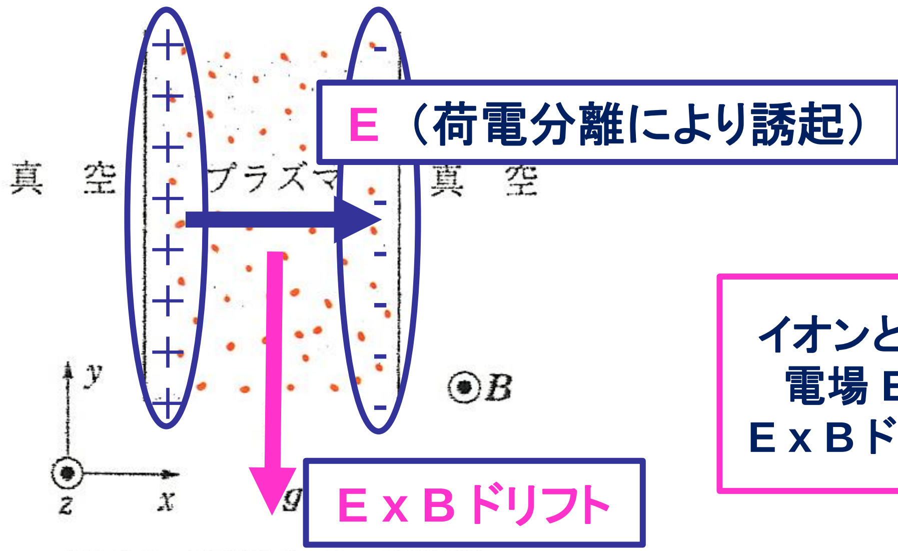
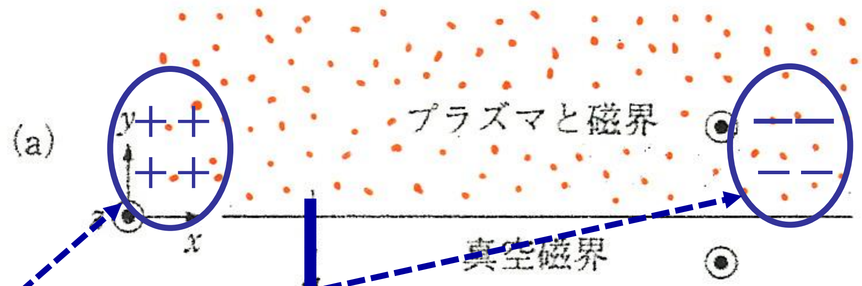



図 6.7　磁界中での平板状プラズマの運動

イオンと電子が逆方向へドリフトすることにより
電場 E が誘起され、その電場と磁場による
E x B ドリフトにより、下方（mg の方向）へ移動

# 磁界中プラズマの集団運動

**―― F x B ドリフトの応用例**
**（b）平板上プラズマの運動 (その2)**




$v_F$ = F x B / qB$^2$ （F x B ドリフト）

F = mg

境界面が平面であれば

左右方向境界が無限遠方の場合、何も起こらないが――

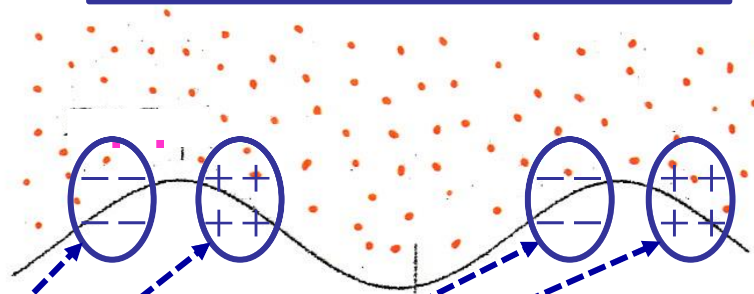
# 磁界中プラズマの集団運動

—— F x B ドリフトの応用例

（b）平板上プラズマの運動 (その2)

境界面に多少の凹凸があれば

凹凸の左右で荷電分離が起こって



$v_F$ = F x B / q$B^2$ （F x B ドリフト）

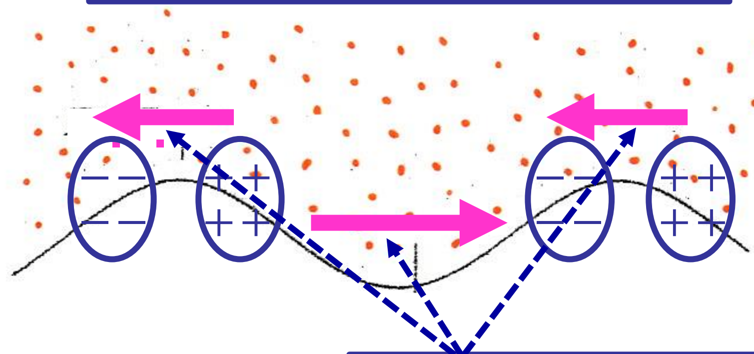
# 磁界中プラズマの集団運動

―― F x B ドリフトの応用例

（b）平板上プラズマの運動 (その2)

境界面に多少の凹凸があれば

凹凸の左右で荷電分離が起こって電場 E が誘起され




$v_F = F \times B / qB^2$（F x B ドリフト）

# 磁界中プラズマの集団運動

—— F x B ドリフトの応用例
（b）平板上プラズマの運動 (その2)

境界面に多少の凹凸があれば

凹凸の左右で荷電分離が起こって電場 E が誘起され

E（荷電分離により誘起）

(b)

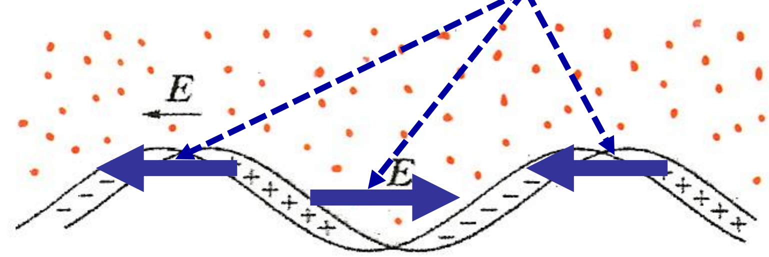



図 6.8　フルート不安定性

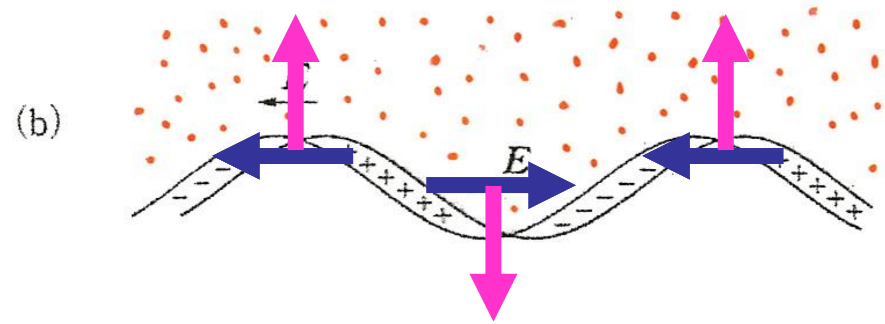
# 磁界中プラズマの集団運動

ーー ＦｘＢドリフトの応用例
（b）平板上プラズマの運動 (その2)

境界面に多少の凹凸があれば

凹凸の左右で荷電分離が起こって電場Ｅが誘起され、ＥｘＢドリフトによりーーー

Ｅ（荷電分離により誘起）

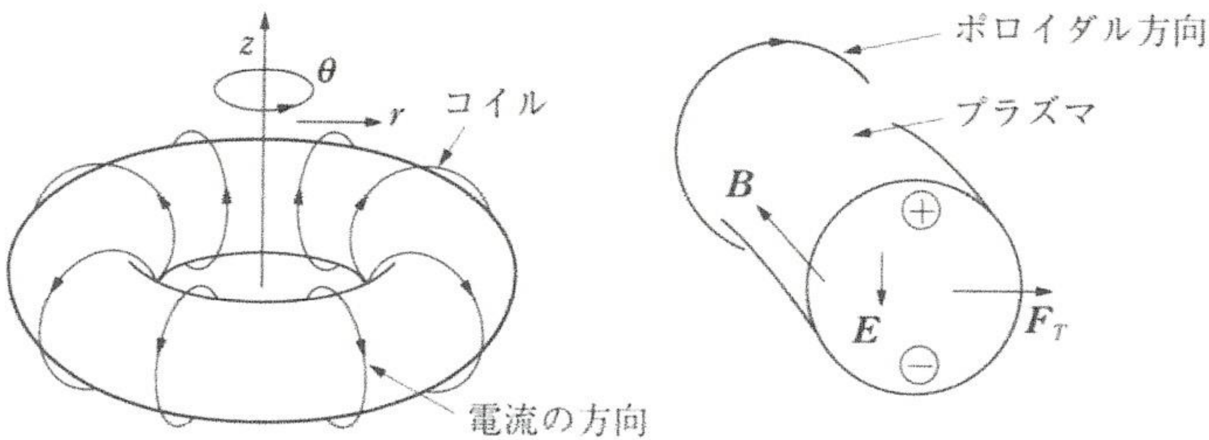



「ＥｘＢドリフト」による
フルート(縦みぞ型)不安定性

図 6.8 フルート不安定性

# 磁界中プラズマの集団運動

ーー E x B ドリフトの応用例
(c) 単純トロイダル磁界中の運動




(a) 磁界の発生　　　(b) 磁界中のドリフト

**単純トロイダル磁場**

で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式 (6.41) のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

## 磁界中プラズマの集団運動 ―― F x B ドリフトの応用例
### (c) 単純トロイダル磁界中の運動 1) 湾曲のある磁界中の性質

## 6.3 磁力線と垂直方向に不均一な磁界

### 6.3.1 湾曲ドリフト ($v_{/\!/}$ によるドリフト)

図 6.9 のように磁力線が湾曲している場合，磁力線に沿って $v_{/\!/}$ の速さで動く粒子には，遠心力

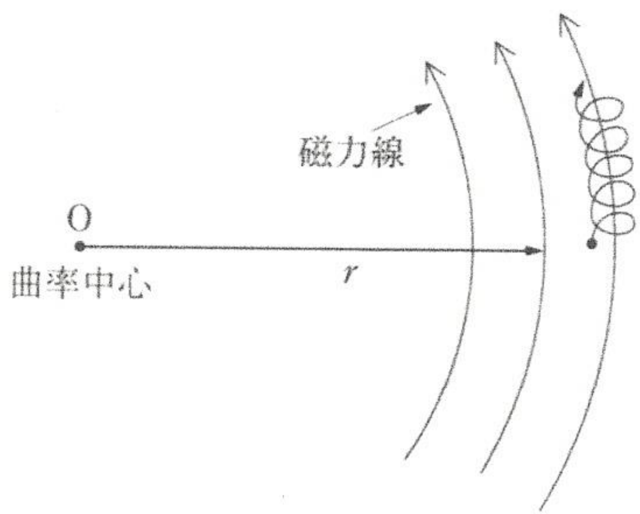



図 6.9 湾曲磁界

# 磁界中プラズマの集団運動 －－ F x B ドリフトの応用例
## （c）単純トロイダル磁界中の運動 1) 湾曲のある磁界中の性質

### 6.3 磁力線と垂直方向に不均一な磁界

#### 6.3.1 湾曲ドリフト（$v_{/\!/}$ によるドリフト）

図 6.9 のように磁力線が湾曲している場合，磁力線に沿って $v_{/\!/}$ の速さで動く粒子には，遠心力

B トーラス磁場（単純トーラス）

F 遠心力
（湾曲のある磁界中での遠心力）

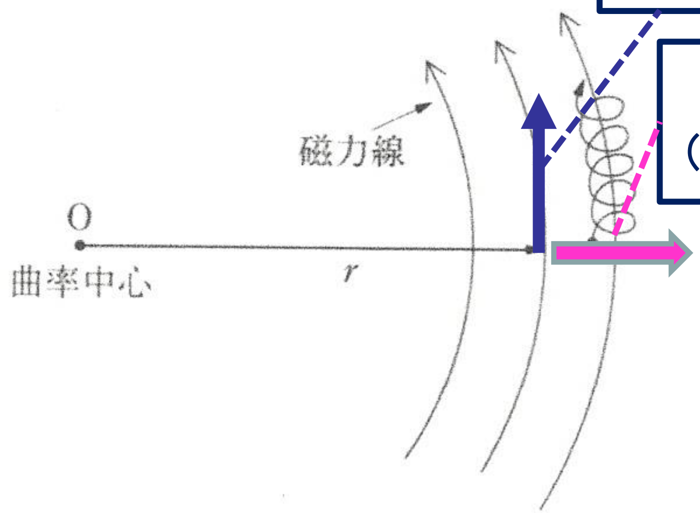



図 6.9 湾曲磁界

# 磁界中プラズマの集団運動 —— F x B ドリフトの応用例

## （c）単純トロイダル磁界中の運動 1) 湾曲のある磁界中の性質

### 6.3 磁力線と垂直方向に不均一な磁界

#### 6.3.1 湾曲ドリフト（$v_{/\!/}$ によるドリフト）

図 6.9 のように磁力線が湾曲している場合，磁力線に沿って $v_{/\!/}$ の速さで動く粒子には，遠心力

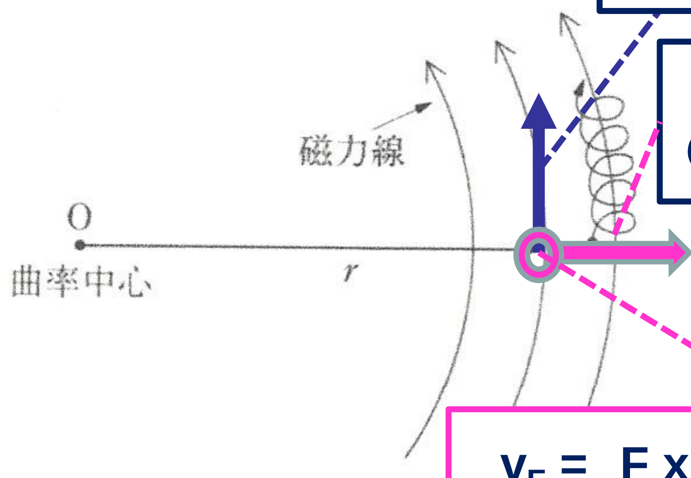
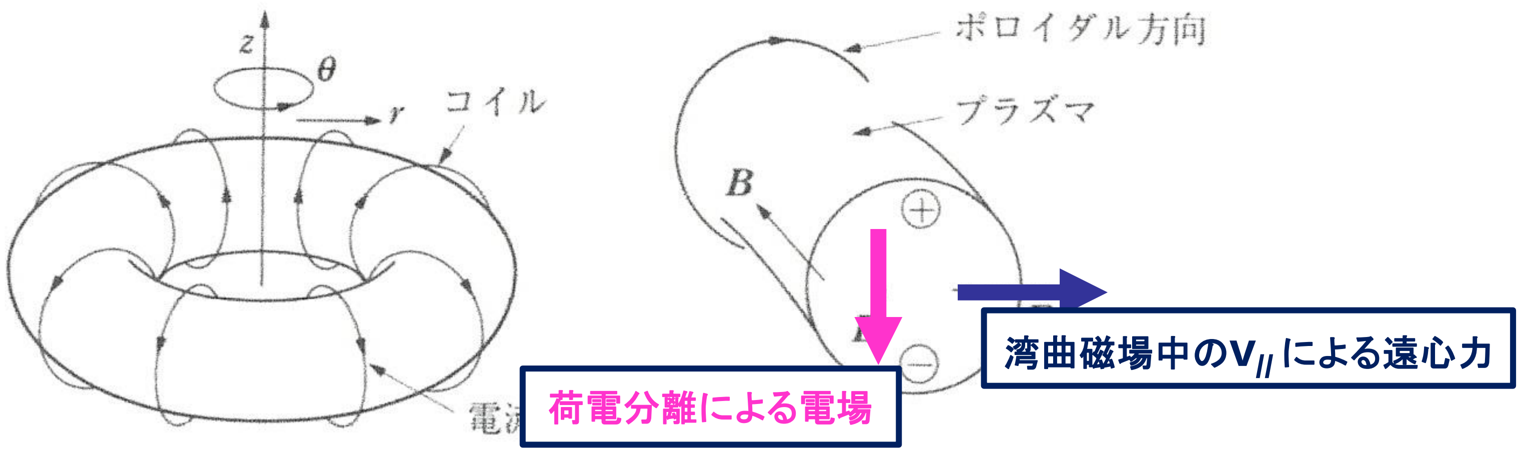



図 6.9 湾曲磁界

B トーラス磁場（単純トーラス）

F 遠心力
（湾曲のある磁界中での遠心力）

$v_F$ = F x B / $qB^2$ （F x B ドリフト）
イオン ： 手前方向
電子 ： 奥方向




(a) 磁界の発生　　(b) 磁界中のドリフト

単純トロイダル磁場

で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式 (6.41) のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

### a.　単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト

上の例が示すように，磁力線が湾曲すると，必ず磁界に勾配ができる．した

# 磁界中プラズマの集団運動 ―― F x B ドリフトの応用例

## （c）単純トロイダル磁界中の運動　2) 磁力線と垂直方向に不均一な磁界中の性質

$$\boldsymbol{F}_R = (mv_{/\!/}{}^2/r)\hat{r} \tag{6.33}$$

が働く．ただし，$r$ は磁力線の曲率半径，$\hat{r}$ は $r$ 方向の単位ベクトルである．$\boldsymbol{F}_R$ は式 (6.14) の $\boldsymbol{F}$ として作用し，その結果ドリフトが生じる．これを湾曲ドリフトまたは曲率ドリフト（curvature drift）という．その速度 $\boldsymbol{v}_R$ は，式 (6.24) により次式で与えられる．

$$\boldsymbol{v}_R = \boldsymbol{F}_R \times \boldsymbol{B}/(qB^2) \tag{6.34}$$

### 6.3.2 $\nabla B$ ドリフト（$v_\perp$ によるドリフト）

後述のように，磁力線が湾曲すると磁界に勾配ができる．そのため，図 6.10 に示すように，$z$ 方向の磁界 $B$ が $x$ 方向に変化する空間での荷電粒子の運動を調べる．ここでは，$v_{/\!/} = 0$ とする．もし $B = B_0$ で空間的に一様ならば，速さが $v_\perp$ の粒子は，ラーマー半径 $a = mv_\perp/(|q|B_0)$ の円運動を行う．そして，ローレンツ力 $q\,(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})$ の 1 旋回についての平均値 $\boldsymbol{F}_B$ はゼロで，ドリ

速さが $v_\perp$ の粒子は，ラーマー半径 $a = mv_\perp/(|q|B_0)$ の円運動を行う。そし
て，ローレンツ力 $q\,(v \times B)$ の1旋回についての平均値 $F_B$ はゼロで，ドリ

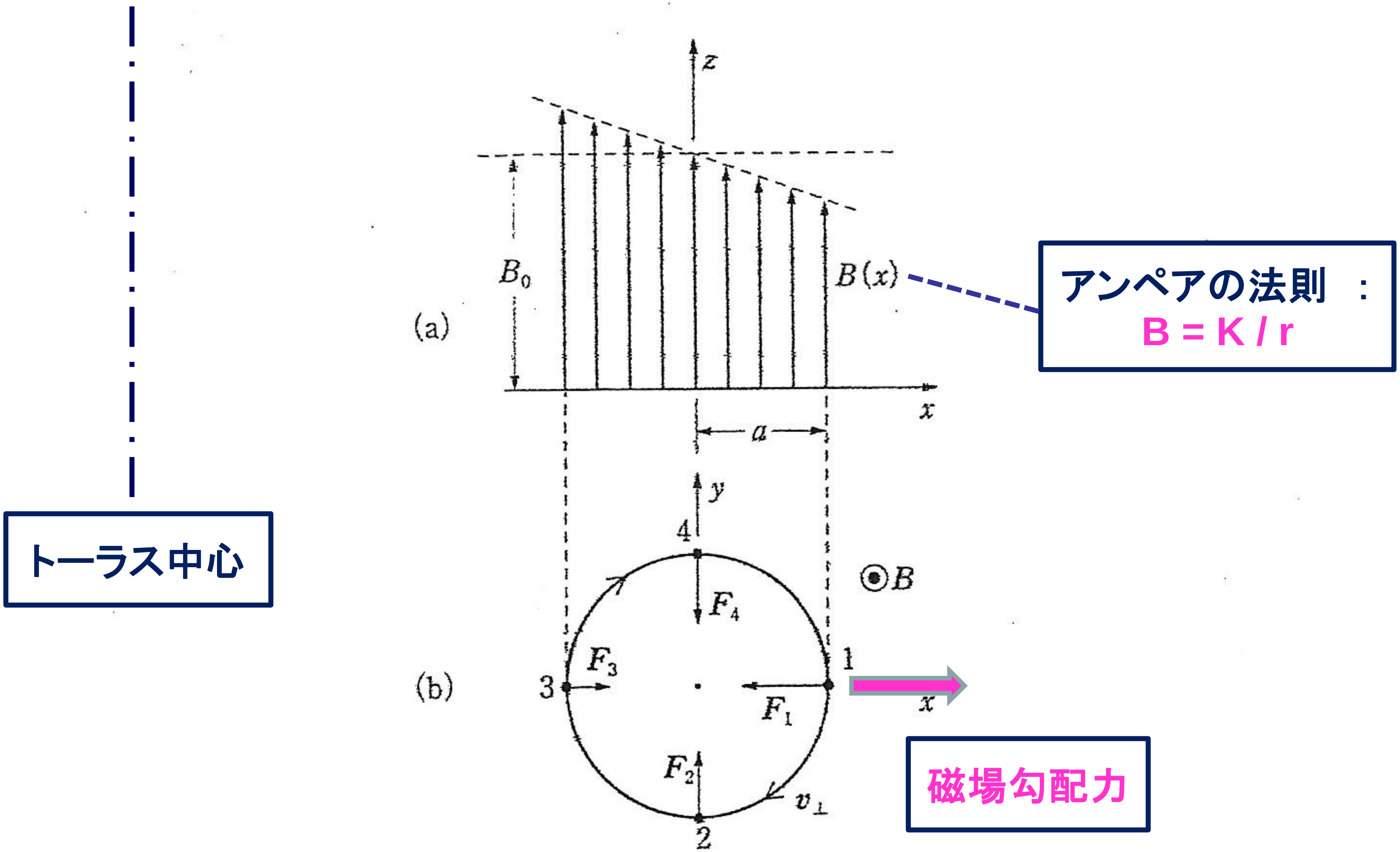



図 6.10　1旋回中正イオンに働く力

フトもしない．一方，$B$ が空間的に不均一な場合には，$\boldsymbol{F}_B$ は一般にゼロとならない．したがって式 (6.14) の $\boldsymbol{F}$ として $\boldsymbol{F}_B$ が作用し，ドリフトが生じる．

次に，図 6.10 の不均一磁界における $\boldsymbol{F}_B$ を求める．半径 $a = mv_\perp/(|q|B_0)$ の円周上の代表点 1，2，3，4 におけるローレンツ力をそれぞれ $\boldsymbol{F}_1$，$\boldsymbol{F}_2$，$\boldsymbol{F}_3$，$\boldsymbol{F}_4$ とすると

$$\boldsymbol{F}_1 = -qv_\perp[B_0 + (\partial B/\partial x)a]\hat{x} \tag{6.35}$$

$$\boldsymbol{F}_3 = qv_\perp[B_0 - (\partial B/\partial x)a]\hat{x} \tag{6.36}$$

$$\boldsymbol{F}_2 + \boldsymbol{F}_4 = 0$$

**アンペアの法則　：　B = K / r**

**➡　dB / dr = －K / r$^2$ = －B / r**

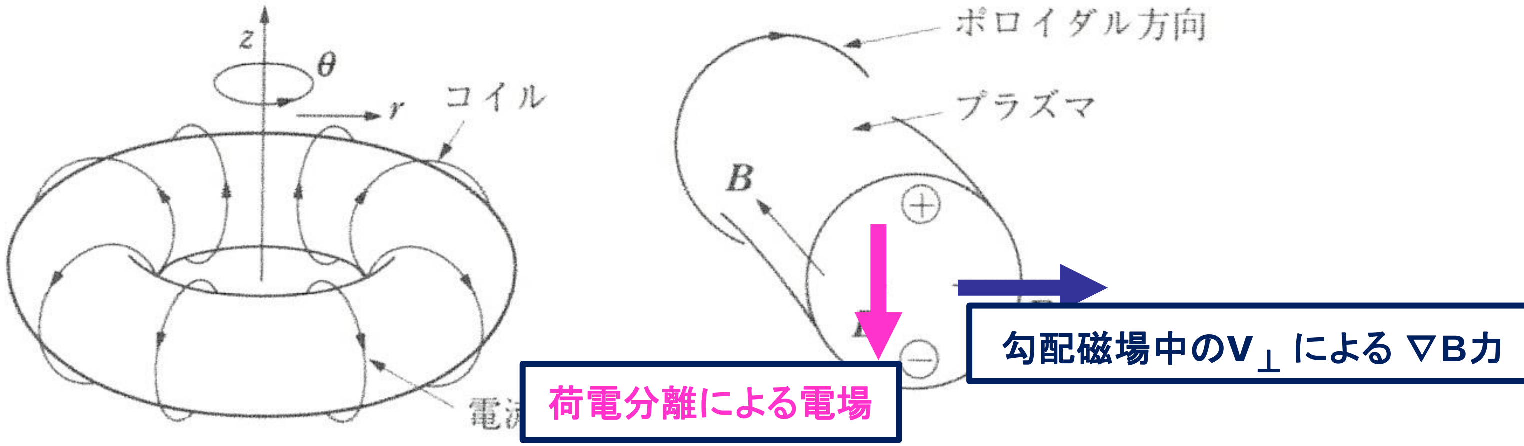
が成立する．ただし，$(\partial B/\partial x)$ は旋回中心での勾配であり，$\hat{x}$ は $x$ 方向の単位ベクトルである．したがって $\boldsymbol{F}_B = (\boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \boldsymbol{F}_3 + \boldsymbol{F}_4)/4$ は

$$\boldsymbol{F}_B = -\frac{1}{2}qv_\perp a\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)\hat{x} = -\mu_m\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)\hat{x} \tag{6.38}$$

$a = \frac{mv_\perp}{qB}$

となる．ただし，

$$\mu_m = \frac{mv_\perp{}^2/2}{B_0} \tag{6.39}$$




（a）磁界の発生　　（b）磁界中のドリフト

**単純トロイダル磁場**

で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式 (6.41) のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

**a.　単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト**

上の例が示すように，磁力線が湾曲すると，必ず磁界に勾配ができる．した

向の直線電流によってもつくられる。

**a.　単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト**

ができる。した

を行う。トロイ

# 湾曲磁場中の $v_{//}$ による遠心力と
# 勾配磁場中の $v_\perp$ による∇B力の合計

(6.42)

となる。したがって $\boldsymbol{F}_R$ と $\boldsymbol{F}_B$ の和 $\boldsymbol{F}_T$ は

$$\boldsymbol{F}_T = \boldsymbol{F}_R + \boldsymbol{F}_B = m\left(v_{//}{}^2 + \frac{v_\perp{}^2}{2}\right)\frac{\hat{r}}{r} \tag{6.43}$$

となる。これによるドリフト速度 $\boldsymbol{v}_T$ は，式 (6.24) により

$$\boldsymbol{v}_T = \boldsymbol{F}_T \times \boldsymbol{B}/(qB^2) \tag{6.44}$$

で与えられる。上式には $q$ が含まれている。したがって，重力ドリフトと同様に，正イオンと電子は反対方向にドリフトする。

**b.　単純トロイダル磁界中のプラズマの運動**

単純トロイダル磁界中に置かれたドーナツ状のプラズマについて考える。その一部を図 6.11（b）に示す。多数の粒子が存在すると，集団としての現象が

# 《単純トロイダル磁場中における作用する力とドリフト》

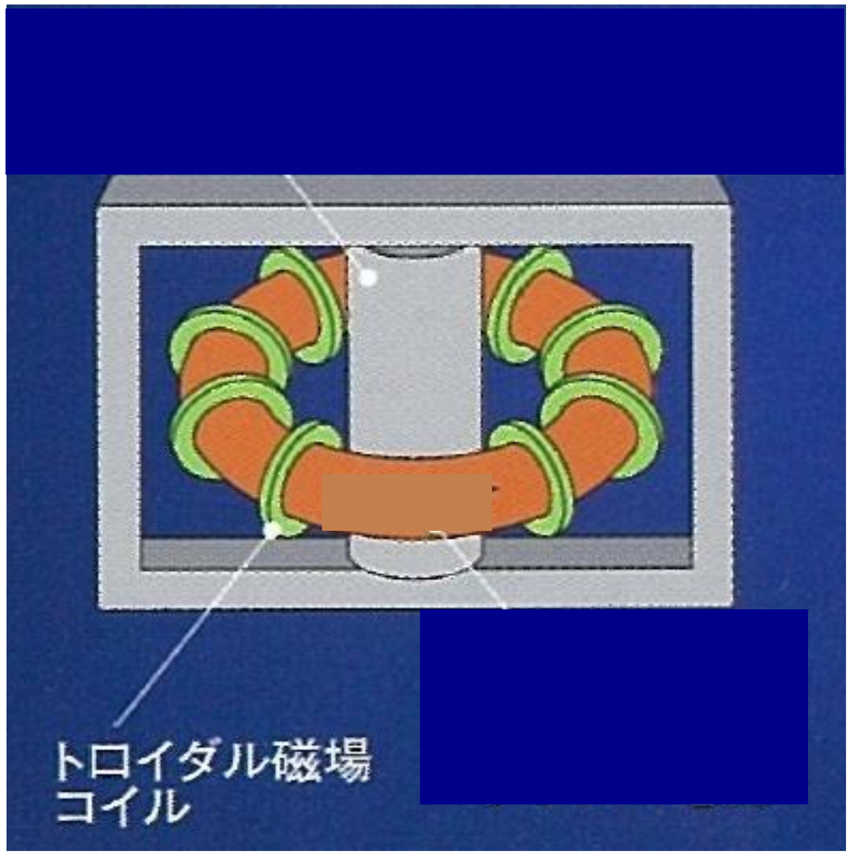
| 原因 | | 作用する力 | ドリフト($\mathbb{F}\times\mathbb{B}$) |
|---|---|---|---|
| (1) $v_{\parallel}$ | ⇒ | 遠心力 $= \mathbb{F}_1 = m\dfrac{v_{\parallel}^2}{r}$ | ⇒ $\mathbb{F}_1 \times \mathbb{B}$ ドリフト = |
| (2) $v_{\perp}$ | ⇒ | 磁場勾配 $\left(\dfrac{\partial B}{\partial r}\right)$ による力 $\mathbb{F}_2 = -\dfrac{m v_{\perp}^2/2}{B}\cdot\dfrac{\partial B}{\partial r}$ | ⇒ $\mathbb{F}_2 \times \mathbb{B}$ ドリフト |

Total $\begin{pmatrix} v_{\parallel} \\ v_{\perp} \end{pmatrix}$ ⇒ 遠心力 + 磁場勾配力 ⇒ $\mathbb{F} \times \mathbb{B}$ ドリフト =

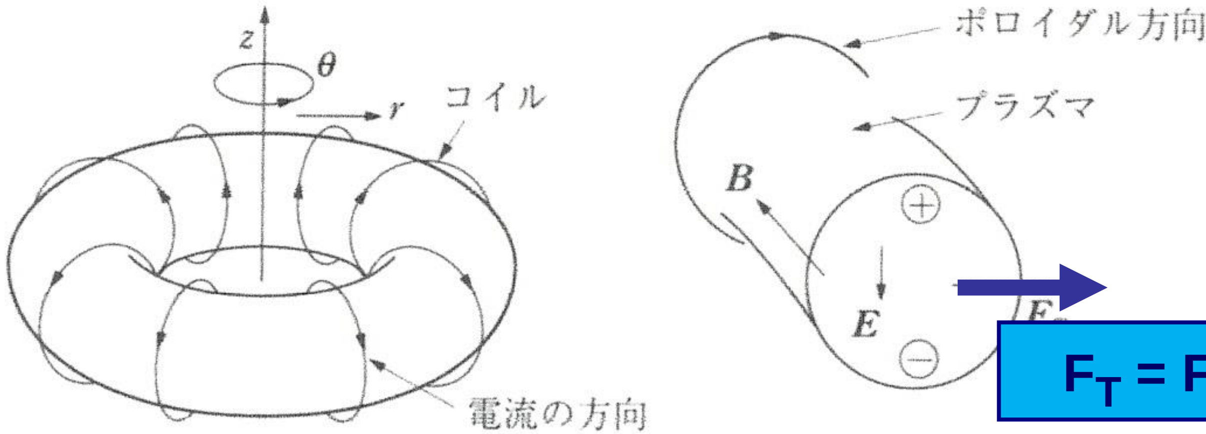
$\qquad\qquad\qquad\;\; \mathbb{F}_1 \qquad\qquad\quad \mathbb{F}_2$

$$(\mathbb{F} = \mathbb{F}_1 + \mathbb{F}_2)$$

# 単純トーラス磁場による
# プラズマの閉じ込め




**ドーナツ状の磁場:トーラス型**




$F_T = F_R + F_B$

(a) 磁界の発生　　(b) 磁界中のドリフト

**単純トロイダル磁場**

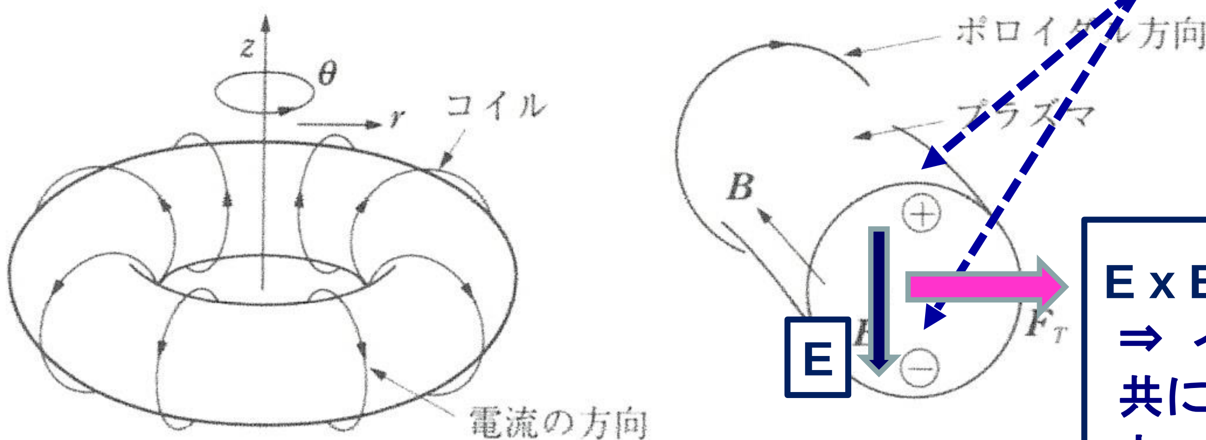
で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式 (6.41) のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

**a.　単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト**

上の例が示すように，磁力線が湾曲すると，必ず磁界に勾配ができる．した

**RB**

**F x B ドリフトによる荷電分離**
**⇒ 電場 E の誘起**
**⇒ その電場との E x B ドリフト**




**E x B ドリフト**
**⇒ イオンも電子も共に ExB ドリフトでトーラスの外に！**

(a) 磁界の発生　(b) 磁界中のドリフト

**単純トロイダル磁場**

で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式 (6.41) のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

**a. 単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト**

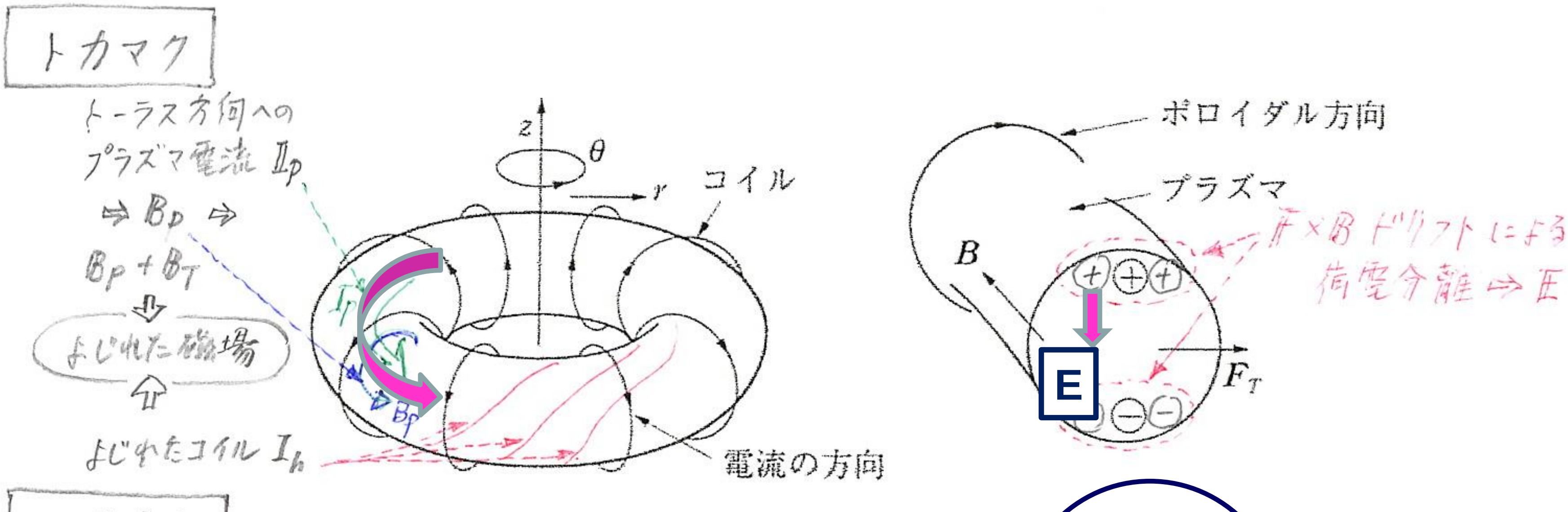
上の例が示すように，磁力線が湾曲すると，必ず磁界に勾配ができる．した

# 《単純トロイダル磁場中における作用する力とドリフト》

| | 原因 | 作用する力 | ドリフト($\mathbb{F}\times\mathbb{B}$) | 荷電分離(方向) | ドリフト($\mathbb{E}\times\mathbb{B}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| (1) | $v_\parallel$ ⇒ | 遠心力 $= \mathbb{F}_1 = m\dfrac{v_\parallel^2}{r}$ ⇒ | $\mathbb{F}_1\times\mathbb{B}$ ドリフト | ⊕イオン 上側<br>⊖電子 下側 | $\mathbb{E}_1$ ⇒ $\mathbb{E}_1\times\mathbb{B}$ ドリフト |
| (2) | $v_\perp$ ⇒ | 磁場勾配 $\left(\dfrac{\partial B}{\partial r}\right)$ による力 $\mathbb{F}_2 = -\dfrac{mv_\perp^2/2}{B}\cdot\dfrac{\partial B}{\partial r}$ ⇒ | $\mathbb{F}_2\times\mathbb{B}$ ドリフト | 〃<br>〃 | $\mathbb{E}_2$ ⇒ $\mathbb{E}_2\times\mathbb{B}$ ドリフト |

Total $\begin{pmatrix} v_\parallel \\ v_\perp \end{pmatrix}$ ⇒ $\underset{\mathbb{F}_1}{\text{遠心力}}$ + $\underset{\mathbb{F}_2}{\text{磁場勾配力}}$ ⇒ $\mathbb{F}\times\mathbb{B}$ ドリフト ⇒ 荷電分離：$\mathbb{E}$ ⇒ $\mathbb{E}\times\mathbb{B}$ ドリフト

$(\mathbb{F} = \mathbb{F}_1 + \mathbb{F}_2)$　　$(\mathbb{E} = \mathbb{E}_1 + \mathbb{E}_2)$




ヘリカル

(a) 磁界の発生　　(b) 磁界中のドリフト

単純トロイダル磁場 ⇒ トーラス閉じ込め ?

で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式 (6.41) のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

**a.　単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト**

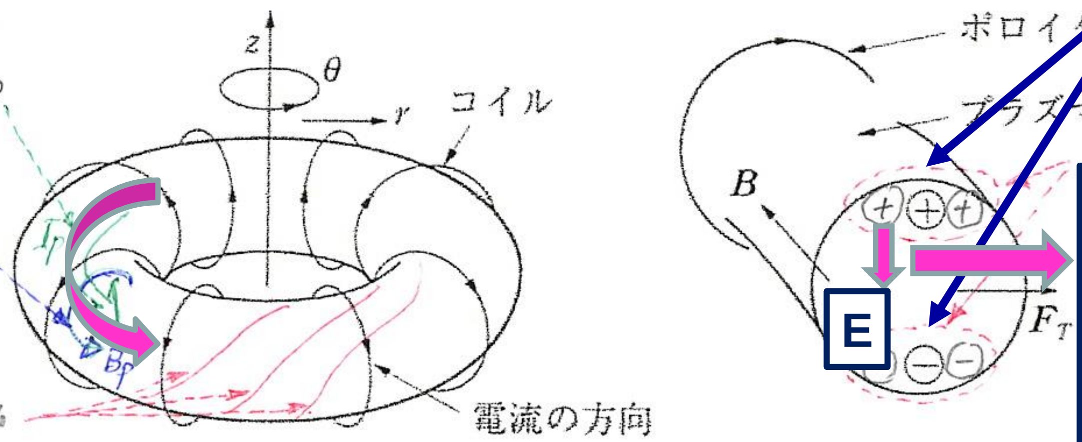
上の例が示すように，磁力線が湾曲すると，必ず磁界に勾配ができる．した

**F x B ドリフトによる荷電分離**
**⇒　電場 E の誘起**
**⇒　その電場 との E x B ドリフト**

トカマク

トーラス方向への
プラズマ電流 $I_p$
⇒ $B_p$ ⇒
$B_p + B_T$
⇩
よじれた磁場
⇧
よじれたコイル $I_h$

ヘリカル




(a) 磁界の発生　　(b) 磁界中のドリフト

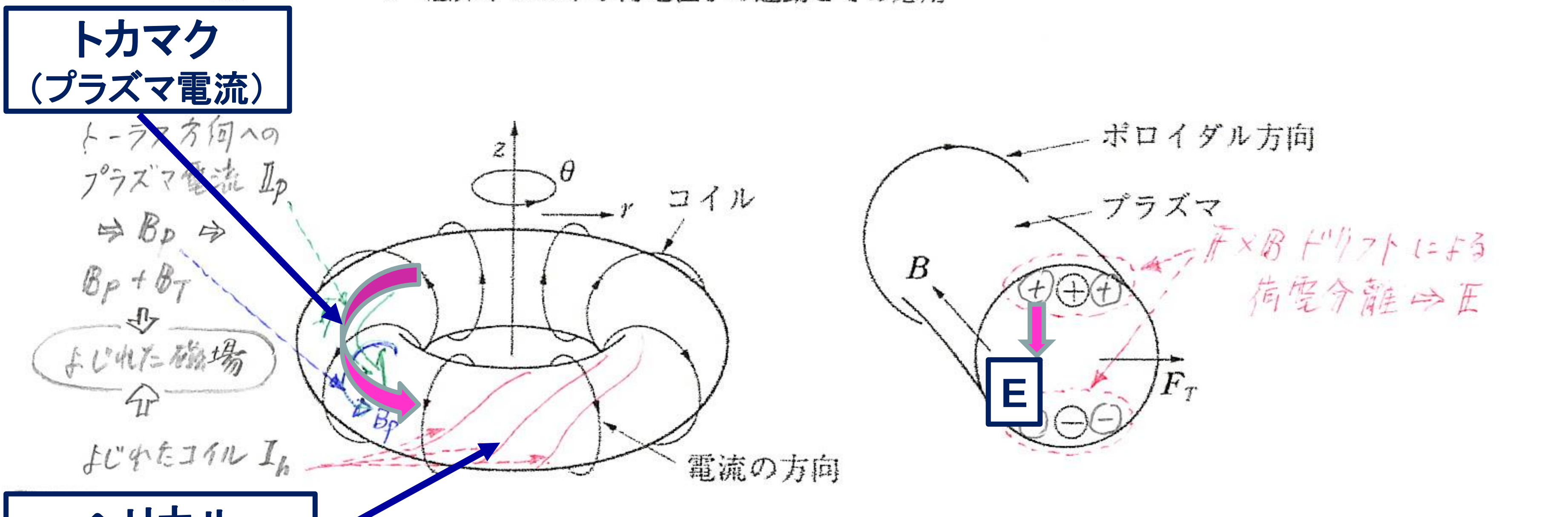
**E x B ドリフト**
**⇒　イオンも電子も**
**共に ExB ドリフトで**
**トーラスの外に！**

**単純トロイダル磁場** ⇒ ~~**トーラス閉じ込め**~~

で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式 (6.41) のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

**a.　単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト**

上の例が示すように，磁力線が湾曲すると，必ず磁界に勾配ができる．した



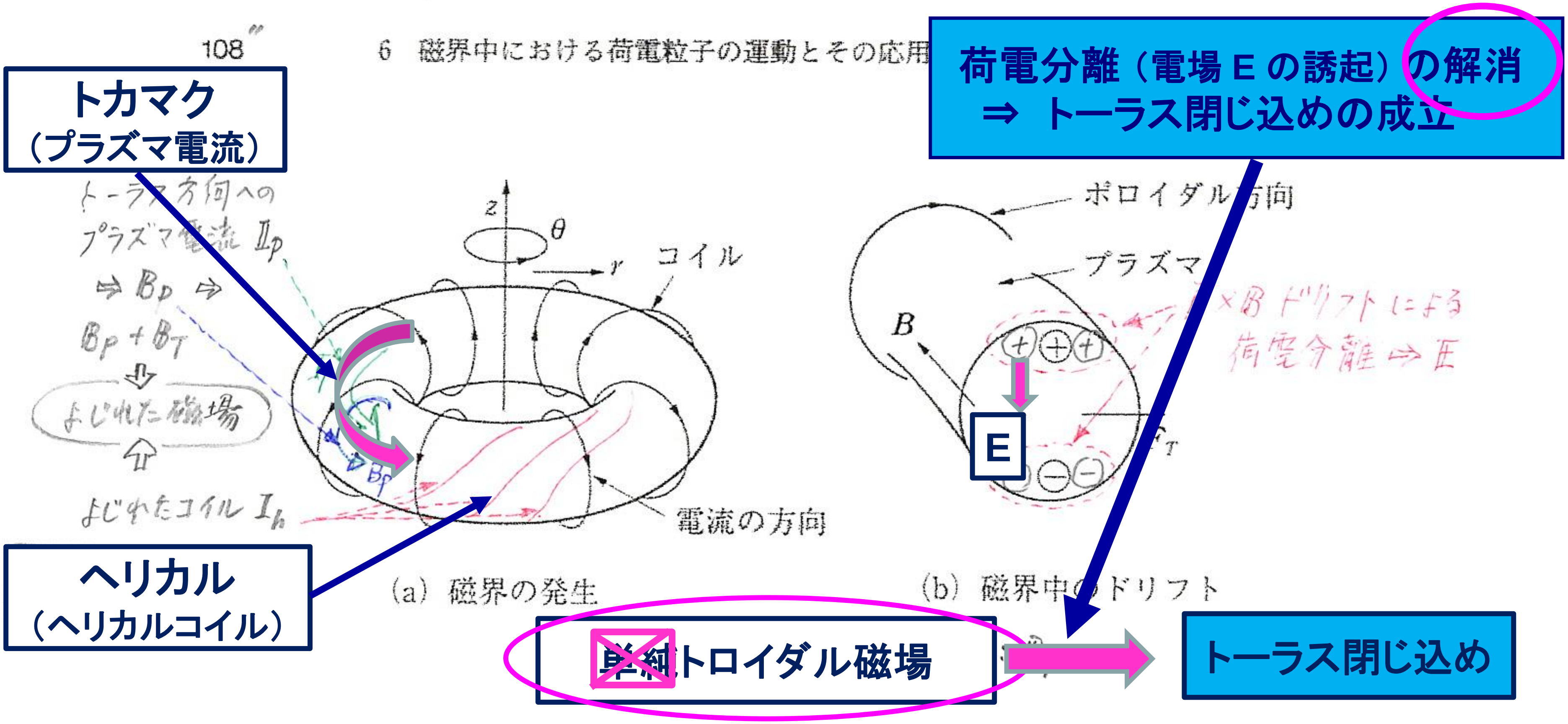

(a) 磁界の発生　　(b) 磁界中のドリフト

単純トロイダル磁場 ⇒ ~~トーラス閉じ込め~~

で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式(6.41)のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

**a.　単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト**

上の例が示すように，磁力線が湾曲すると，必ず磁界に勾配ができる．した




(a) 磁界の発生　　(b) 磁界中のドリフト

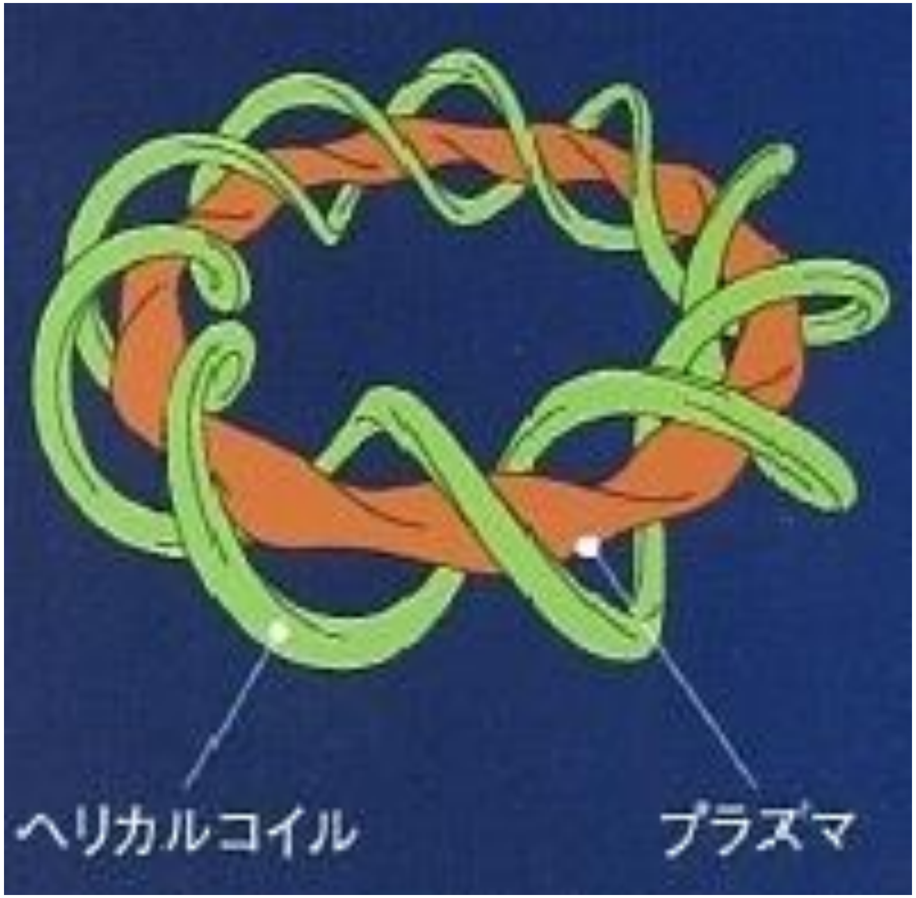
で与えられる．ただし，$K$ はコイルの巻数と電流に関係した定数で，$r$ はコイルの中心（$z$ 軸）からの距離である．$\theta$ 方向を**トロイダル**（toroidal）方向といい，式 (6.41) のような磁界を，**単純トロイダル磁界**という．この磁界は，$z$ 方向の直線電流によってもつくられる．

**a.　単純トロイダル磁界中の単一粒子のドリフト**

上の例が示すように，磁力線が湾曲すると，必ず磁界に勾配ができる．した

# トカマク型とヘリカル型


**トカマク型**




**ヘリカル型**