

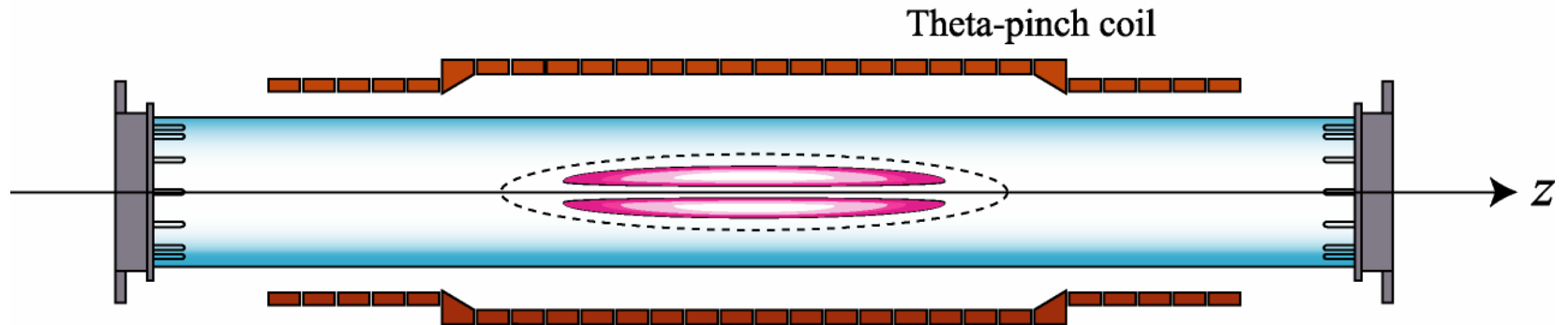
第7回若手科学者によるプラズマ研究会 2005年3月15-17日 於原研那珂

# FRCプラズマにおけるソーセージ不安定性

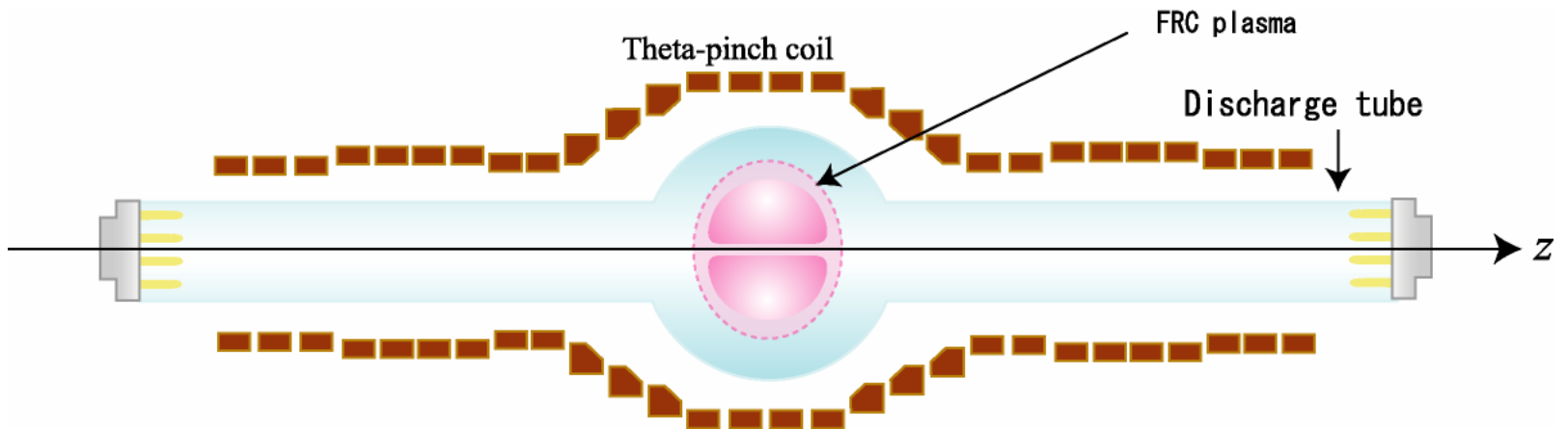
藤野俊之, 金丸雄紀

日大理工

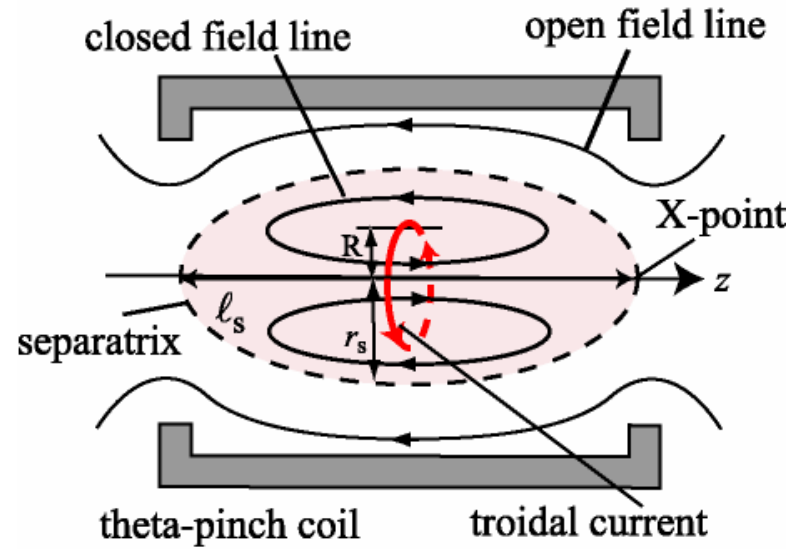
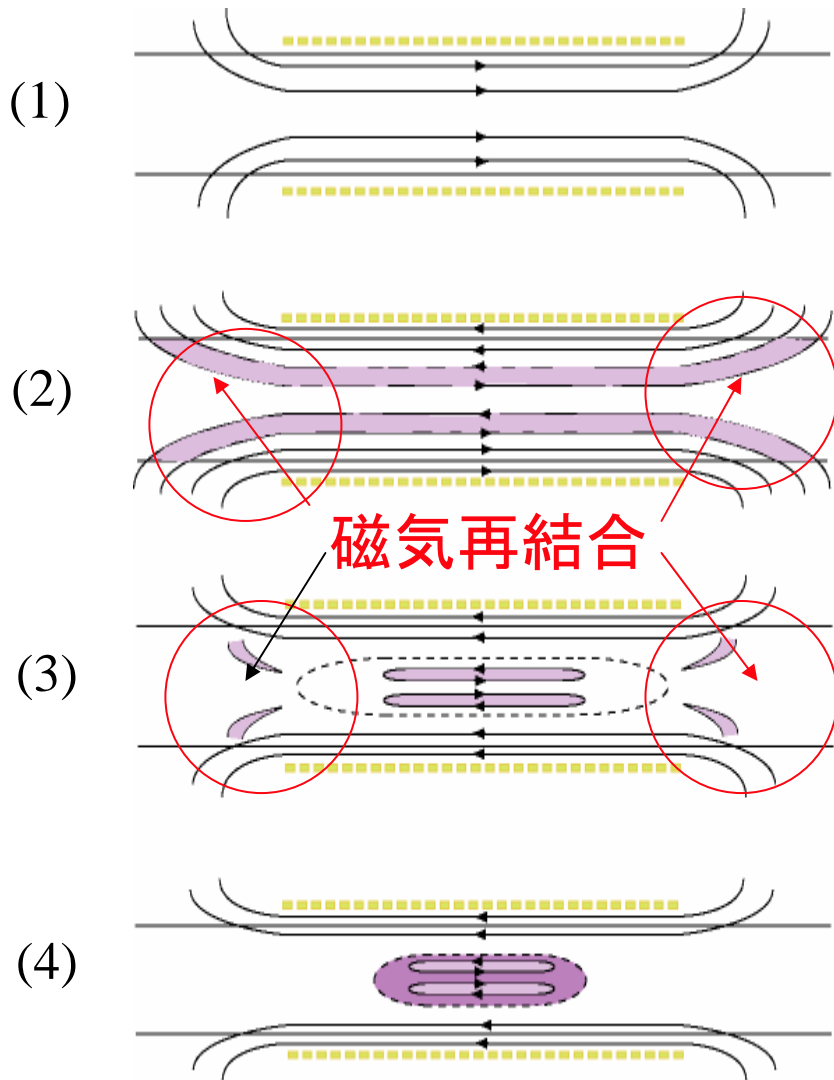
## NUCTE — III



## NUCTE — SP



# FRCプラズマ



$r_s$ : セパトトリックス半径

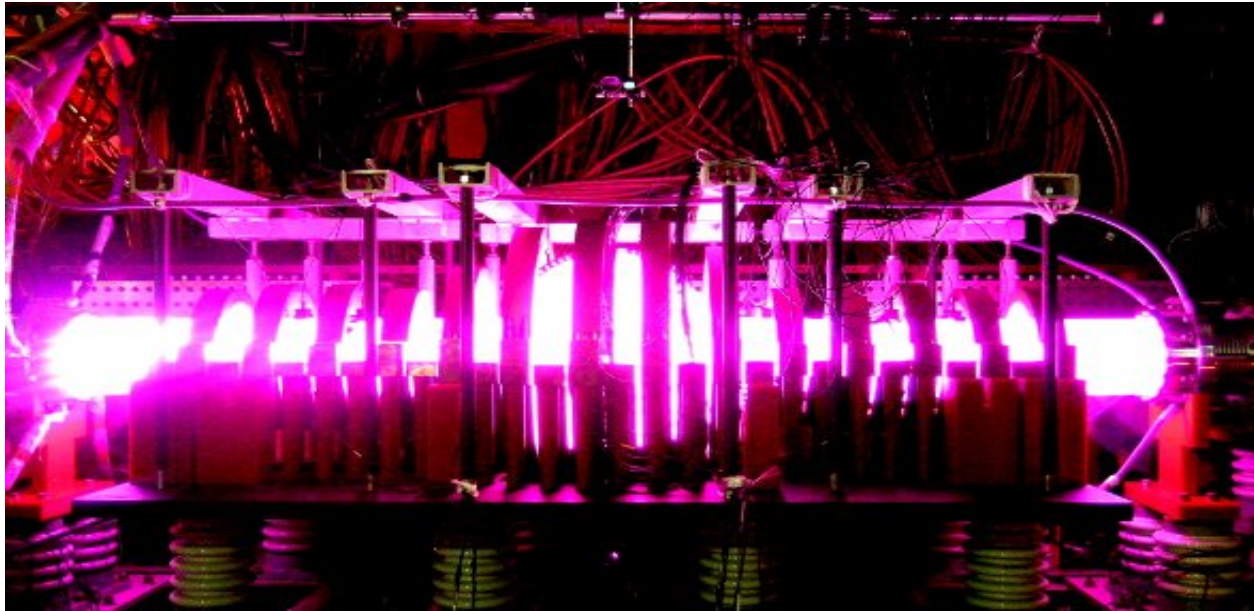
$\ell_s$ : セパトトリックス長

$R$ : 磁気軸の位置

特徴

- $\beta$ 値が高い
- 構造が単純

# Experiment device



NUCTE- III

## Device parameters

z-discharge : 34kA  
Bias field : -0.032 T  
Main field : 0.6 T (at peak)

## Plasma parameters ( $t=20 \mu s$ )

Radius : 0.05 m  
Length : 0.8 m  
Electron density :  $3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$   
Electron and Ion temperatures : 200 eV

# 1 研究背景

磁場反転配位(Field-reversed configuration:略称FRC)プラズマの揺動運動に着目した研究が日大核融合グループにより精力的に進められてきた。一連の実験の中にプラズマのセパラトリックス半径が時間と共に著しく減少する(閉じ込めの低下)放電があることがわかった。この現象はシータピンチコイルの全長を縮小し、楕円率の小さいFRCを生成すると100%の確率で発生した。バイアス磁場強度を変化させたときの半径の時間変化は最大軸圧縮時刻まで類似した振る舞いをするが、それ以降は異なることがわかった。その結果、最大軸圧縮時刻のセパラトリックスの形状(楕円率)がその後の閉じ込め状態を決定していると考え、その発生起源を追求する研究に着手した。

# 研究背景

---

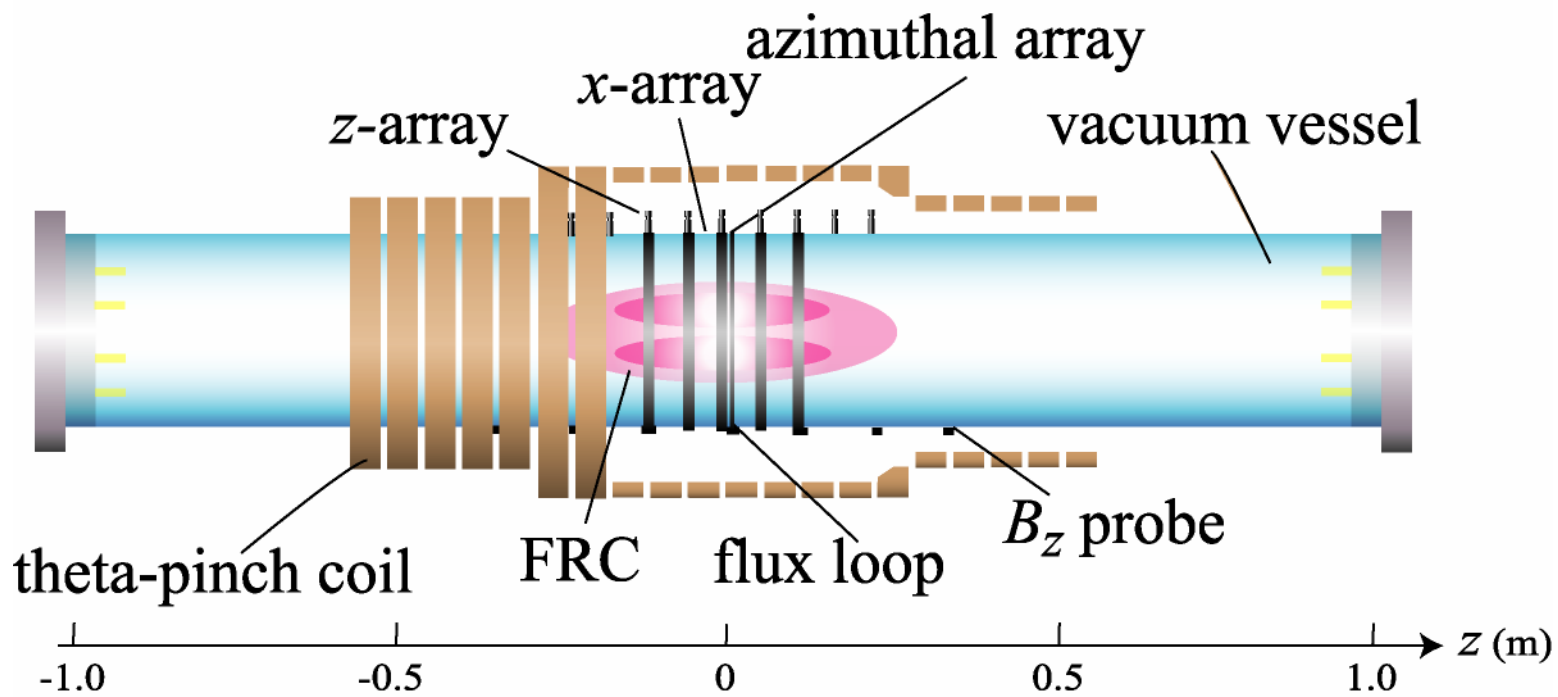
- FRCプラズマの揺動運動の発生機構に着目して研究を進めてきた過程でバイアス磁場強度を上げるとセパトリックス半径の減衰速度が著しく上がるものが観測された。この現象は従来の装置と比べてシータピンチコイルの全長を3分の2程度に縮小しFRCの楕円率を小さくしたところ100%の割合で発生することがわかった。
- この現象をより詳しく調べるために光学測定器を用いた多断面測定を行ったところ、ソーセージ不安定性と思われる現象が観測された。
- ソーセージ不安定性が閉じ込め低下や他の不安定性とどのような関連性を持つか調べることにした。

# 研究目的

光学測定による光強度等高線の結果からセパラトリックス内部においてソーセージ不安定性と思われる現象が確認された。この現象はFRCに流れるトロイダル電流の非一様性が原因であると考えた。トロイダル電流は局所的に見ると直線電流として扱うことができるために、Zピンチモデルの磁気流体不安定性を調べた。ソーセージ不安定性は交換不安定性の一種であることから、交換不安定性が要因となって閉じ込めの低下が発生すると考えた。

本研究では、閉じ込めの低下がソーセージ不安定性の発生に起因することを明らかにする。

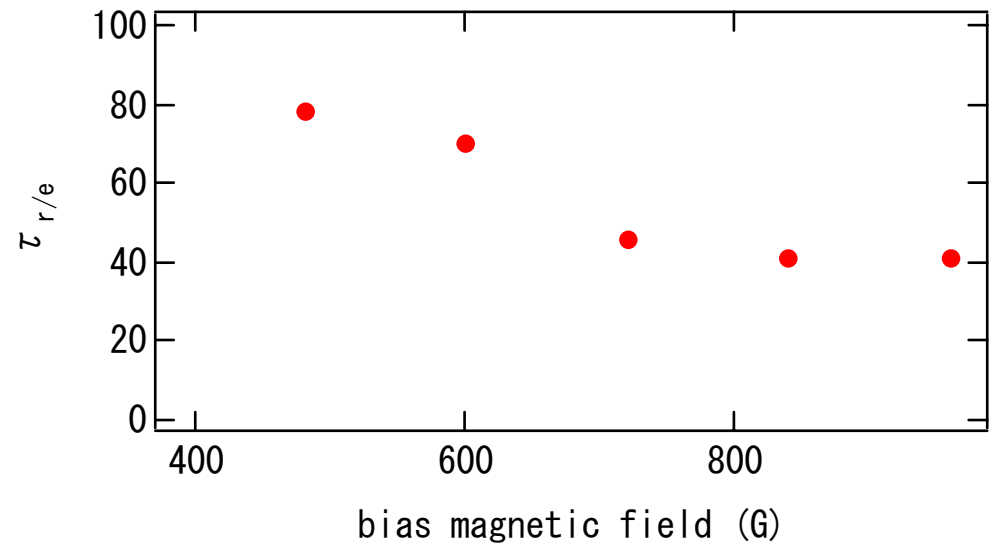
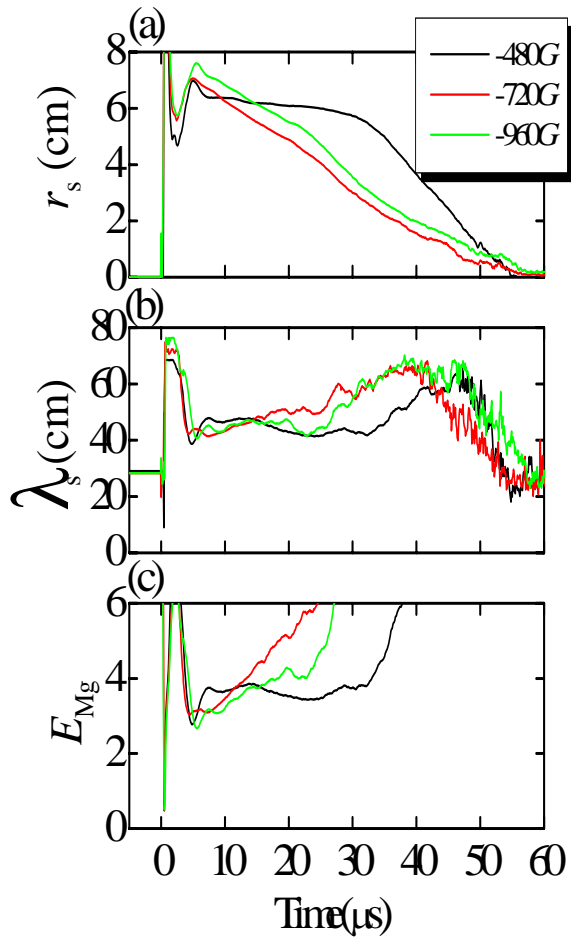
# 実験装置



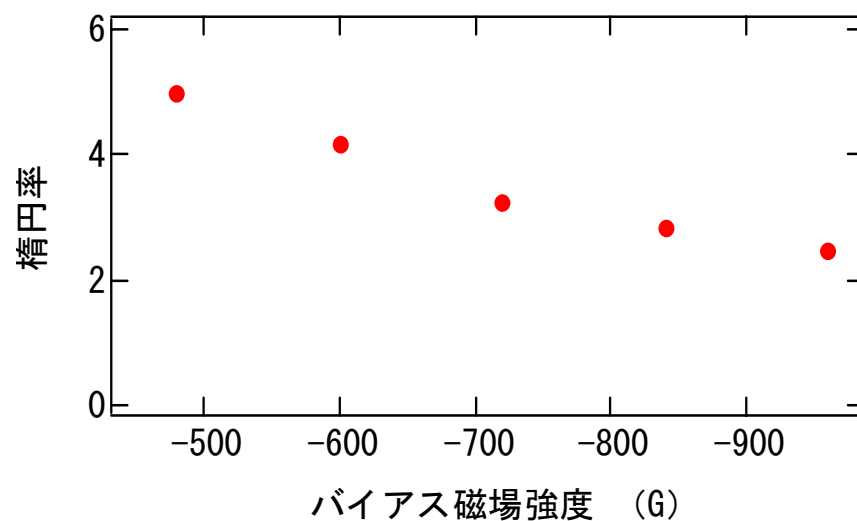
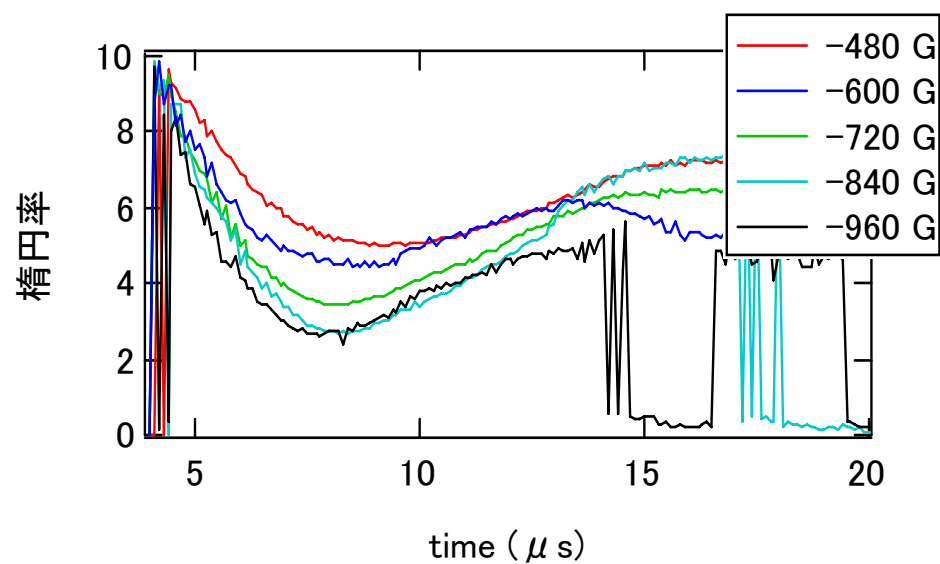
NUCTE-III



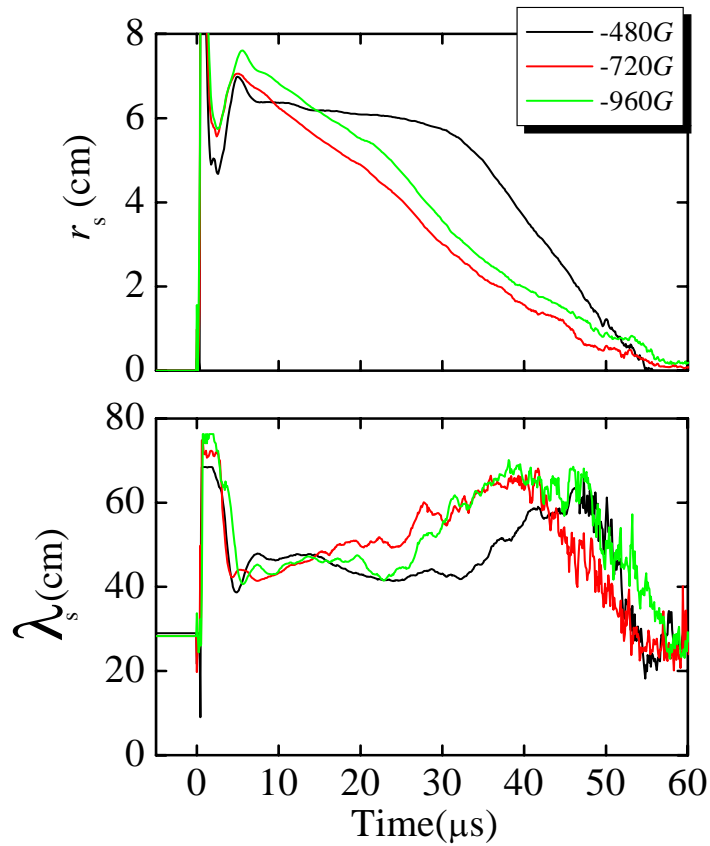
# セパトリックスのバイアス磁場依存性



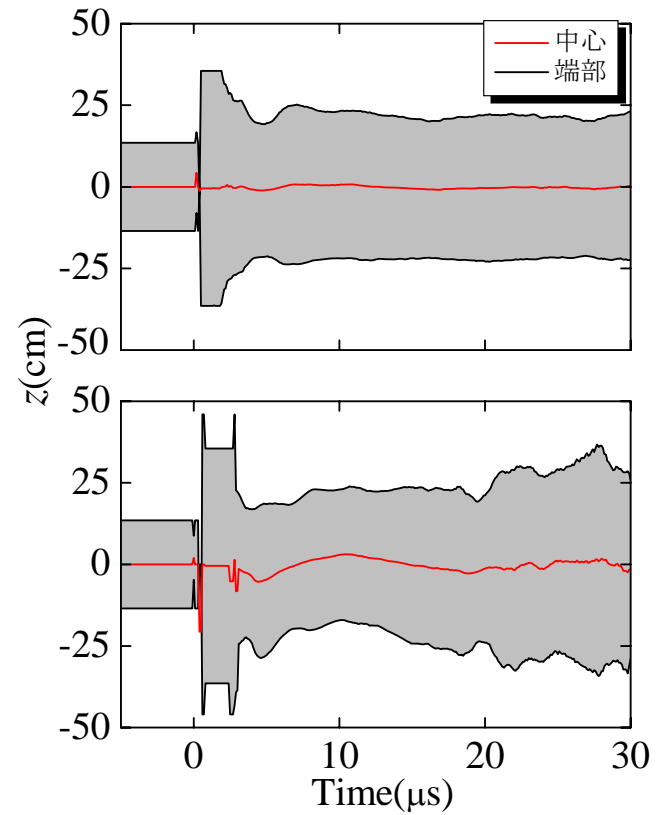
# 楕円率のバイアス磁場依存性



# z軸方向の揺動運動

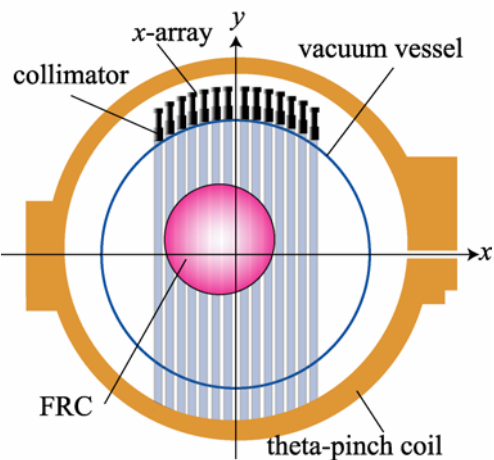
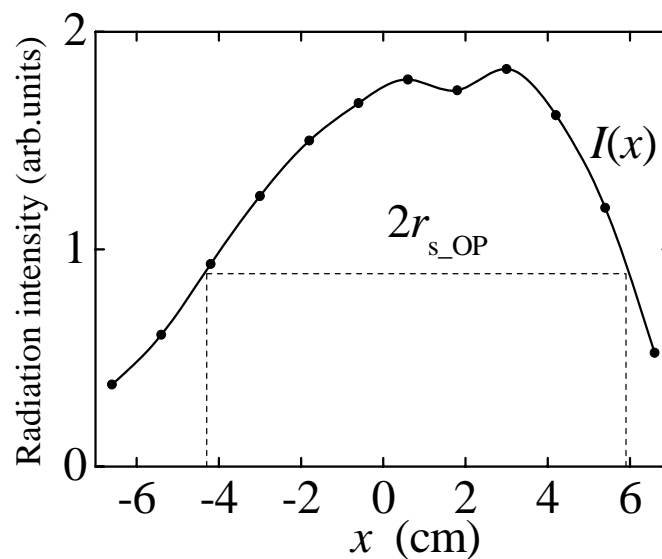
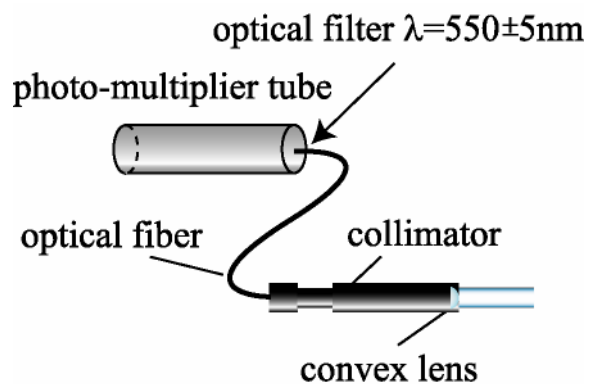


半径と長さの時間変化

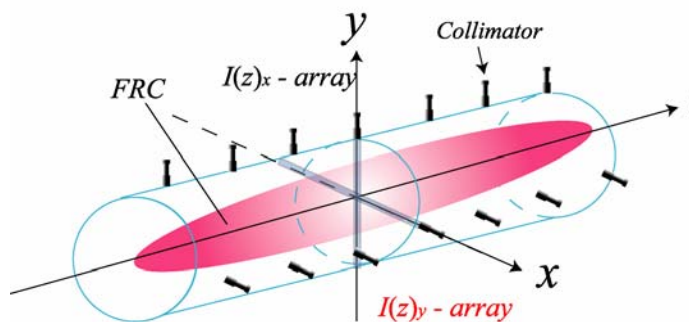


軸方向運動

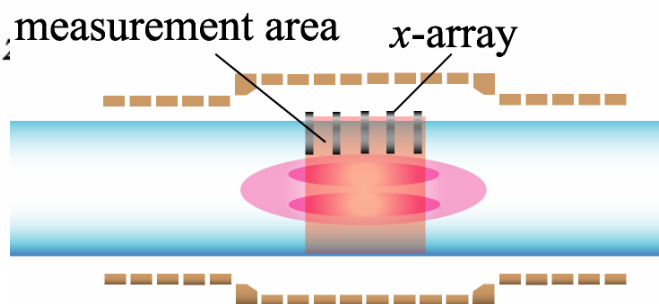
# 光学測定 (1)



x方向配列

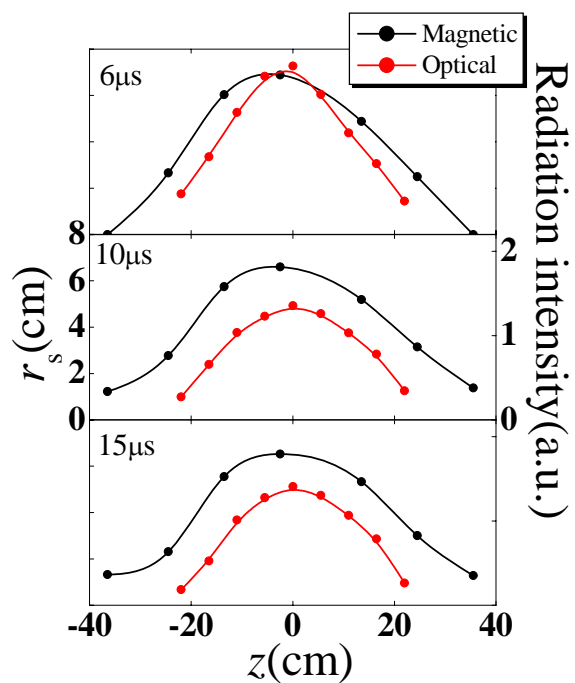


z方向配列

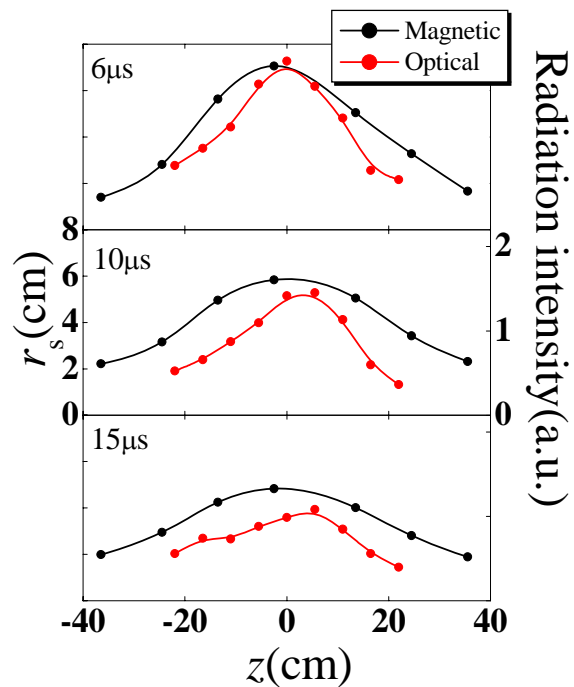


多断面測定

# 光学測定と磁場測定と比較



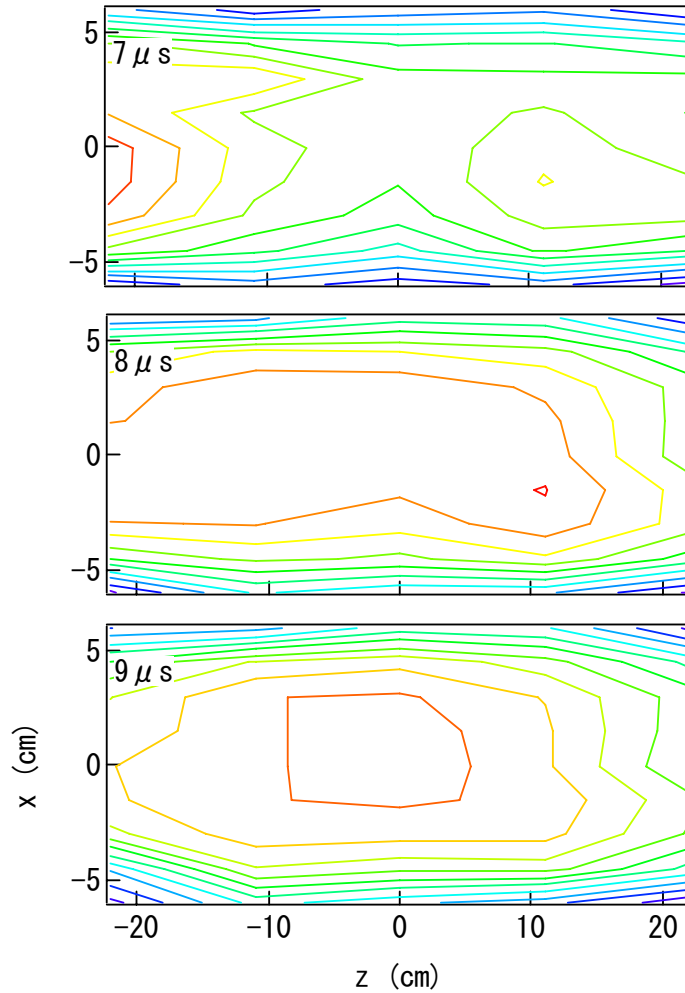
(a) -480G



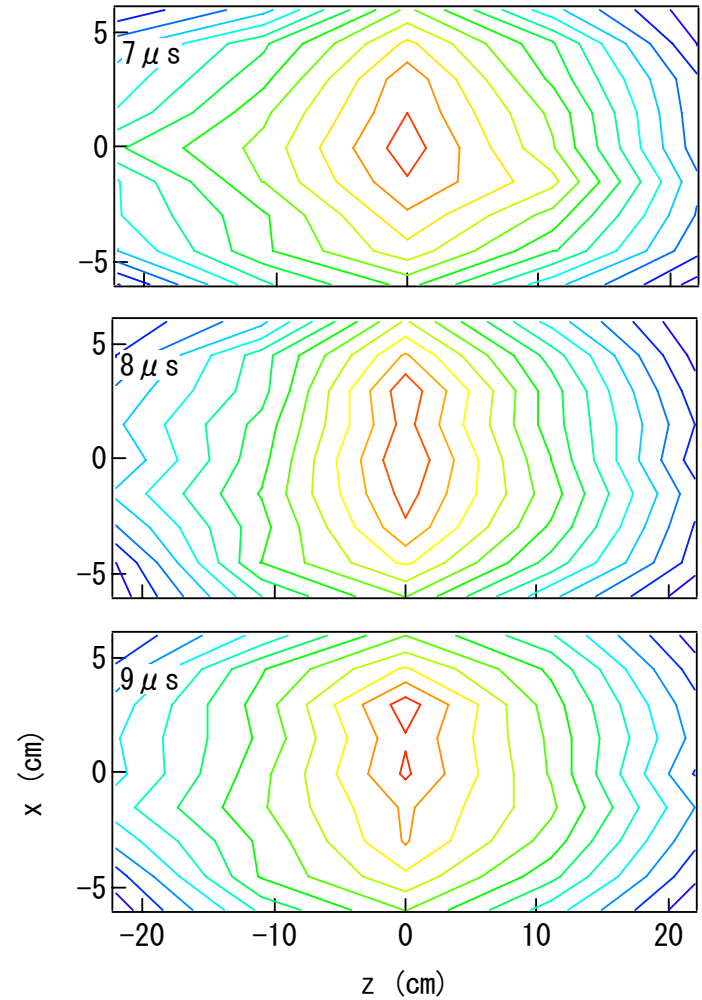
(b) -960G

# 多断面測定

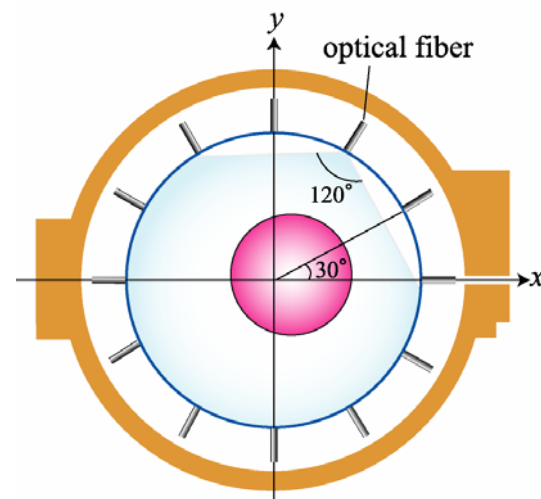
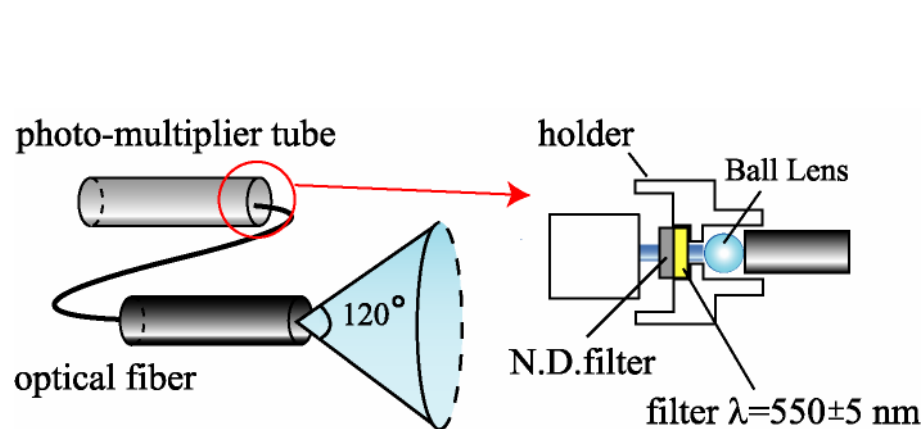
バイアス磁場  $-470\text{ G}$ 、楕円率 5



バイアス磁場  $-940\text{ G}$ 、楕円率 2.5



## 光学測定（２）（広開口角ファイバー）



フーリエ級数

$$I(\theta_i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1} (a_n \cos n\theta_i + b_n \sin n\theta_i)$$

フーリエ係数

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(\theta_i) \cos n\theta_i d\theta_i \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(\theta_i) \sin n\theta_i d\theta_i \quad (n = 1, 2, \dots)$$

$\theta$ 方向配列

$\theta_i$ : 光ファイバーとx軸の角度

$n$ : トロイダルモード数

# トロイダルモードの成長

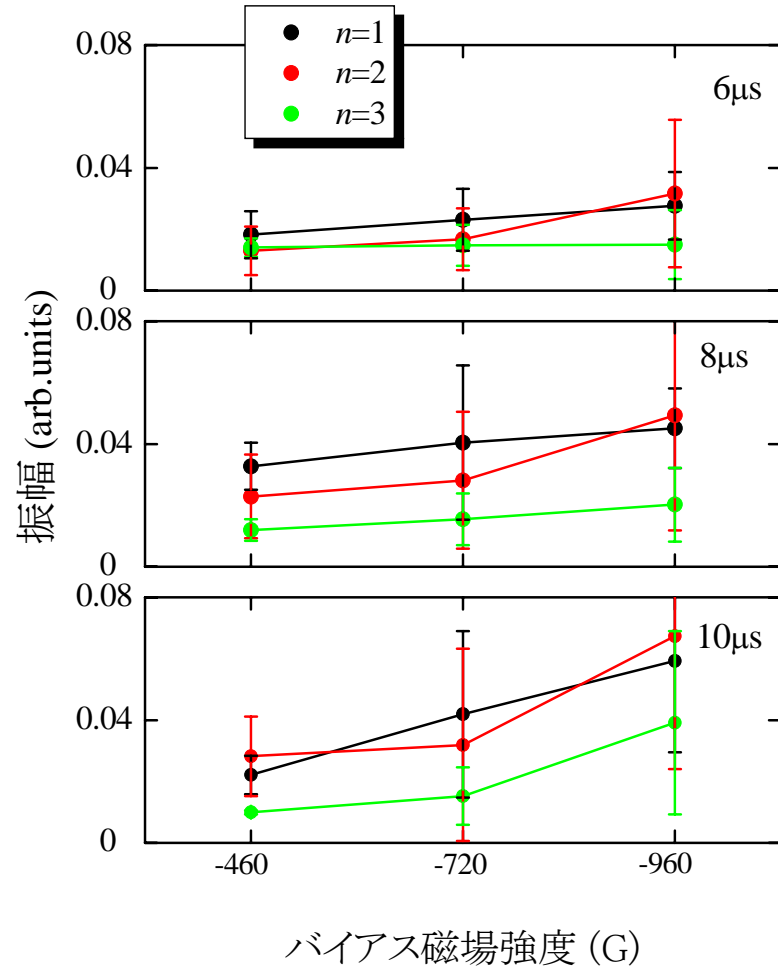
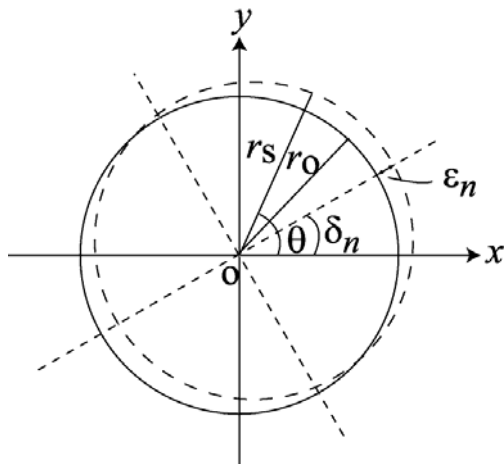
$$r_s = r_o + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_n \cos(n\theta \pm \delta_n)$$

$r_o$ : 平衡状態の半径

$n$ : トロイダルモード数

$\varepsilon_n$ : 摂動振幅

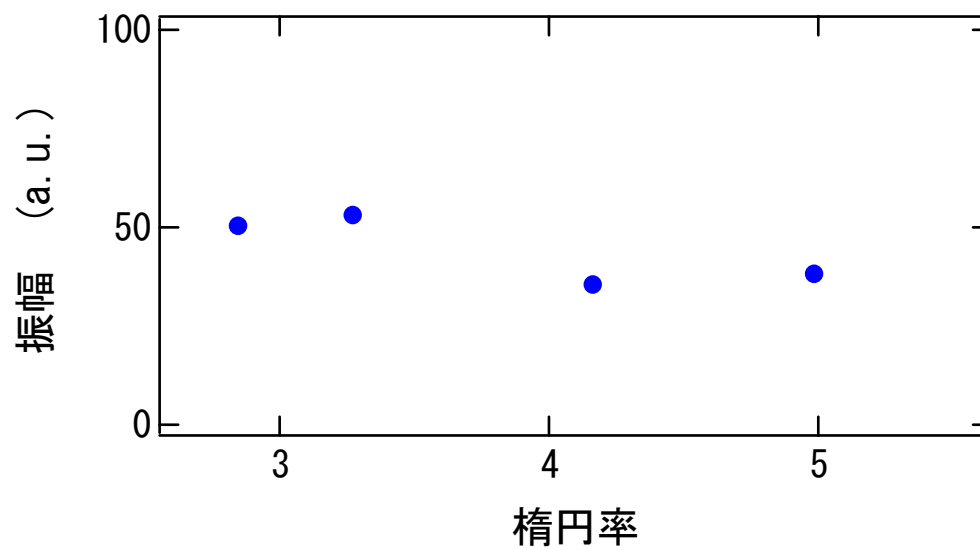
$\delta_n$ : 摂動の初期位相



バイアス磁場強度とトロイダルモード振幅



# 楕円率とトロイダルモードの相関



## 実験結果のまとめ

---

- (1) バイアス磁場強度を強くするとセパラトリックスの楕円率が小さくなり、閉じ込めの低下が発生する。
- (2) 閉じ込めの低下が発生するとセパラトリックス内部の光強度分布が非対称になる。
- (3) バイアス磁場強度によって最大軸圧縮後のトロイダルモード振幅の成長が変化する。
- (4) 閉じ込めの低下での光強度は一様に分布せず、強い箇所が時間経過と共に現われる。

# エネルギー原理による安定化条件

ポロイダルモード  $m=0$  の交換不安定性の安定条件

Kadomtsev の条件

$$-\frac{dp}{dr} \frac{r}{p} < \frac{4\gamma}{2 + \gamma\beta}$$

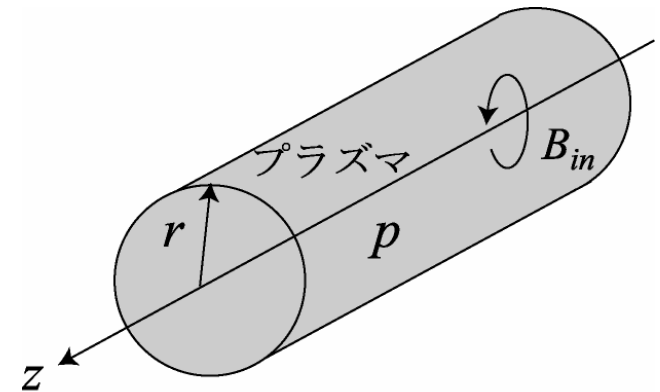
$\mu_0$ : 真空の透磁率

$p$ : プラズマ圧力

$$\beta = \frac{p}{B_{in}^2 / 2\mu_0}$$

$\gamma$ : 比熱比 (=5/3)

$B_{in}$ : 内部磁場



Zピンチモデル

# SteinhauerモデルによるFRCの圧力分布

## 磁束関数 $\psi(r, z)$

$$\psi(r, z) = \frac{B_0 r^2}{2} \left\{ 1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} + \frac{1-N}{1+(6+N)(\varepsilon^2/4) + (1+N)(\varepsilon^4/4) + N(\varepsilon^6/32)} \right. \\ \left. \times \left[ \frac{\varepsilon^2}{4} \left( 1 + \frac{\varepsilon^2}{2} \right) - \left( 1 - \frac{\varepsilon^4}{8} \right) \left( \frac{\varepsilon^2 r^2}{4 a^2} - \frac{z^2}{b^2} \right) - \left( 1 + \frac{\varepsilon^2}{4} \right) \left( \frac{\varepsilon^4 r^4}{8 a^4} - \frac{3\varepsilon^2 r^2 z^2}{2 a^2 b^2} + \frac{z^4}{b^4} \right) \right] \right\}$$

$$\varepsilon = \frac{a}{b} = \frac{1}{E}, \quad N \equiv \frac{b^2}{a R_s}$$

$a$  : セパラトリックスの短軸

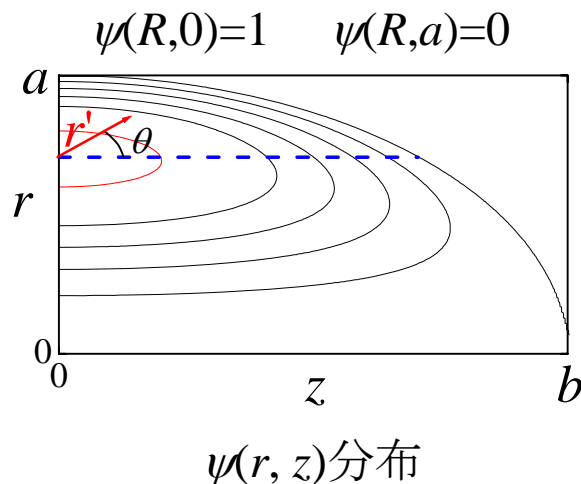
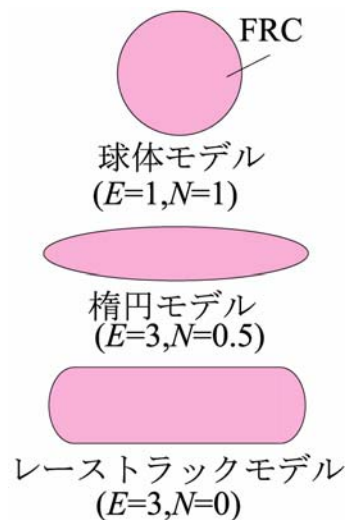
$b$  : セパラトリックスの長軸

$e$  : 楕円率の逆数

$N$  : 曲率係数

$R_s$  : 曲率半径

$B_0$  : セパラトリックス表面の  
磁場に比例する物理量



## 圧力と磁束関数の関係式

$$p(\psi) = C\psi(r, z)$$

( $C$ =定数)

## 安定性を評価する方向

$$\theta = 0, \pi/2$$

# Kadomtsevの条件による安定性の評価

数値計算(磁気軸近傍)

$$p(R, z) = p(r, 0) = 0.92$$

$$(\theta=0) \quad (\theta=\pi/2)$$

実験値

$$\theta = 0 \quad p(z) \propto n(z) \propto \sqrt{\frac{I(z)}{2r_s(z)}}$$

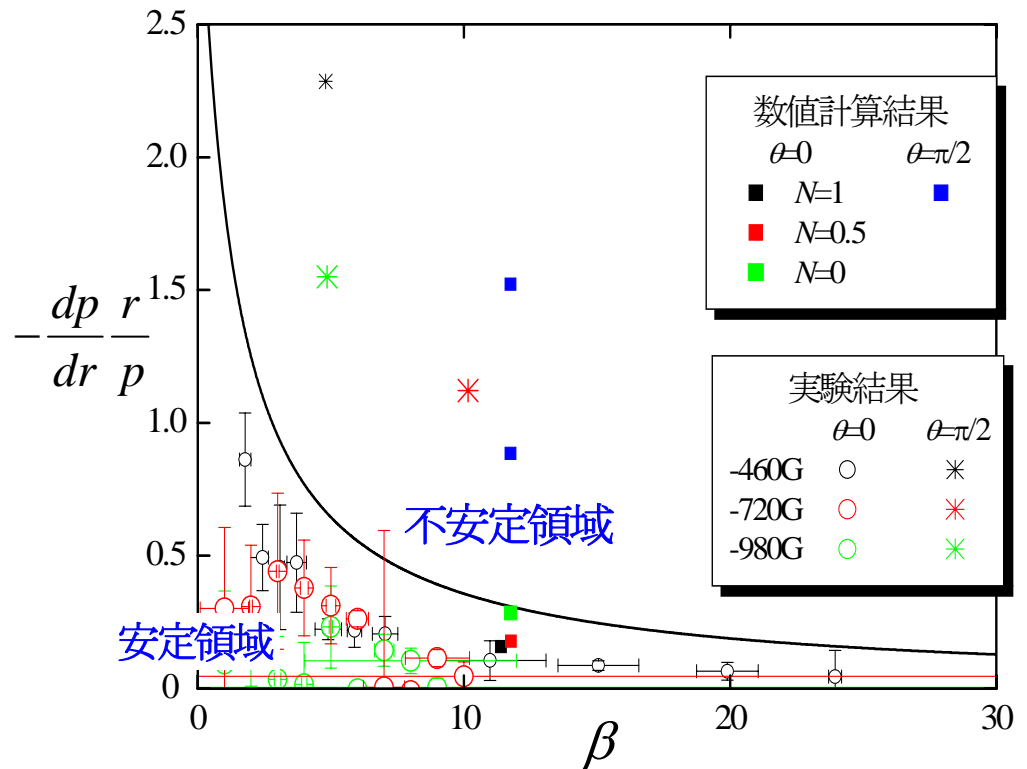
$$\theta = \pi/2 \quad p(r) \propto n(r) \propto \sqrt{i(r)}$$

$$\beta = \frac{p(r)}{B_{in}^2 / 2\mu_0} = \frac{p(r)}{B_{out}^2 / 2\mu_0 - p(r)}$$

$$= \frac{p(r)}{p_0 - p(r)} = \frac{p(r)/p_0}{1 - p(r)/p_0}$$

$B_{out}$ : 外部磁場

$p_0$ : 磁気軸の圧力



## まとめ

---

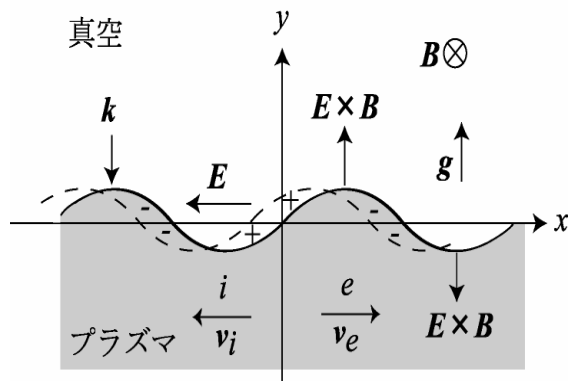
- (1) 楕円率が小さくなると閉じ込めの低下が発生し、トロイダルモードの成長率が大きくなることがわかった。
- (2) トロイダル電流におけるソーセージ不安定性の安定性を評価すると安定領域と不安定領域があることがわかった。しかし、ソーセージ不安定性が直接閉じ込めの低下を促進させるかは明らかにすることはできなかった。
- (3) 楕円率とソーセージ不安定性の関連を明確にすることができなかった。

## ○交換不安定性

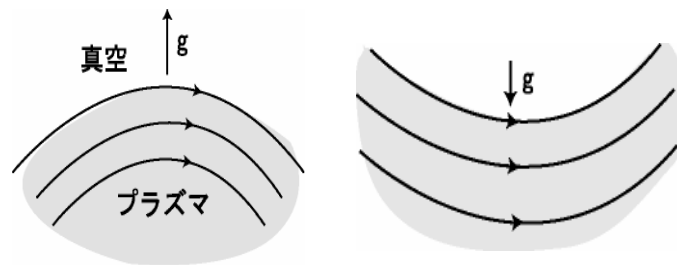
イオン及び電子のドリフト運動

$$v_i = \frac{M}{e} \frac{g \times B}{B^2} \quad v_e = -\frac{m}{e} \frac{g \times B}{B^2}$$

電場が生じ  $E \times B$  によってプラズマ領域と真空領域が入れ替わる不安定性



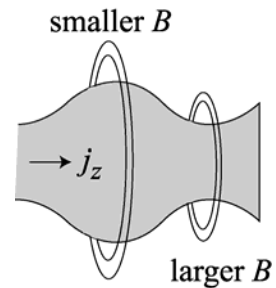
電場による粒子のドリフト



不安定状態

安定状態

## ○ソーセージ不安定性



ソーセージ不安定性

## まとめ

---

- プラズマの楕円率を2.5～4にしてバイアス磁場強度を上げるとプラズマ半径の減衰率が大きくなる。
- 光学測定器での多断面測定により、FRCプラズマ生成後の軸方向圧縮によりソーセージ不安定性が発生している可能性があることがわかった。