

# 磁気プローブ測定と平衡再構成による 低アスペクト比RFPの 内部磁場構造の研究

発表者： 大木健輔

池添竜也, 恩地拓己, 村田健一, 島津弘行, 山下哲生,  
三瓶明希夫, 比村治彦, 政宗貞男

京都工芸繊維大学 プラズマ基礎工学研究室

## RFPの低アスペクト比化

- ・主要モード有理面の間隔が広がる  
→磁気島のオーバーラップ(磁気面が破れる)が  
起こりにくくなる
- ・ブートストラップ電流(自発電流)が増加
- ・閉じ込めに良いとされる「**準シングルヘリシティ  
状態**」(準単一モード状態)になりやすくなる

・・・等の利点があることが、近年理論的に  
予測されている

- ・ S.Shiina et al., Phys. Plasmas 12, 080702 (2005)
- ・ H.Sugimoto et al., PPCF 47, 1287 (2005)
- ・ K.Hayase et al, EPS2005 paper

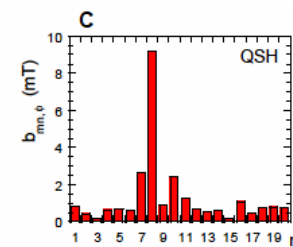
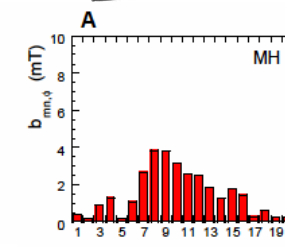
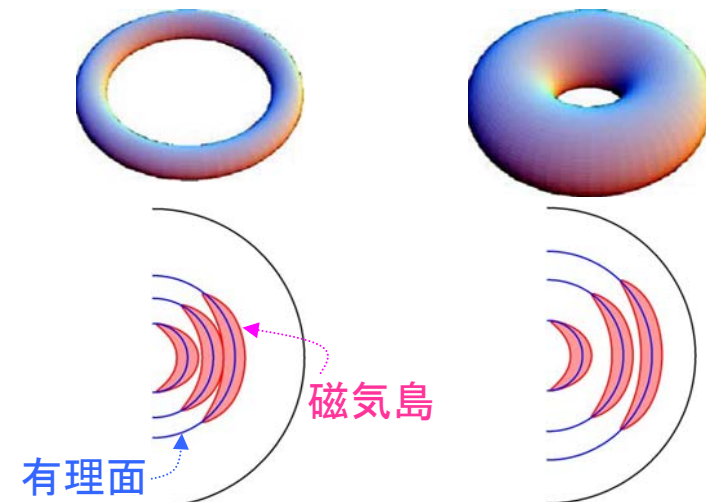
低アスペクト比RFPの実験は世界的にも  
まだほとんど行われていない

→ 本研究室で実験研究

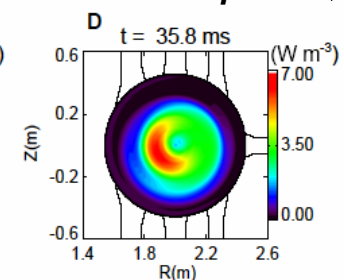
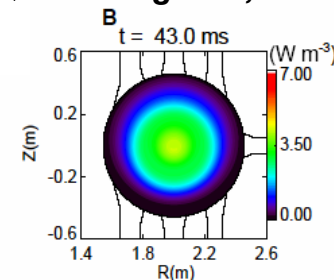
アスペクト比 = 大半径 / 小半径

アスペクト比: 高

アスペクト比: 低



(R. Paccagnella, IEA / RFP Workshop 2000)



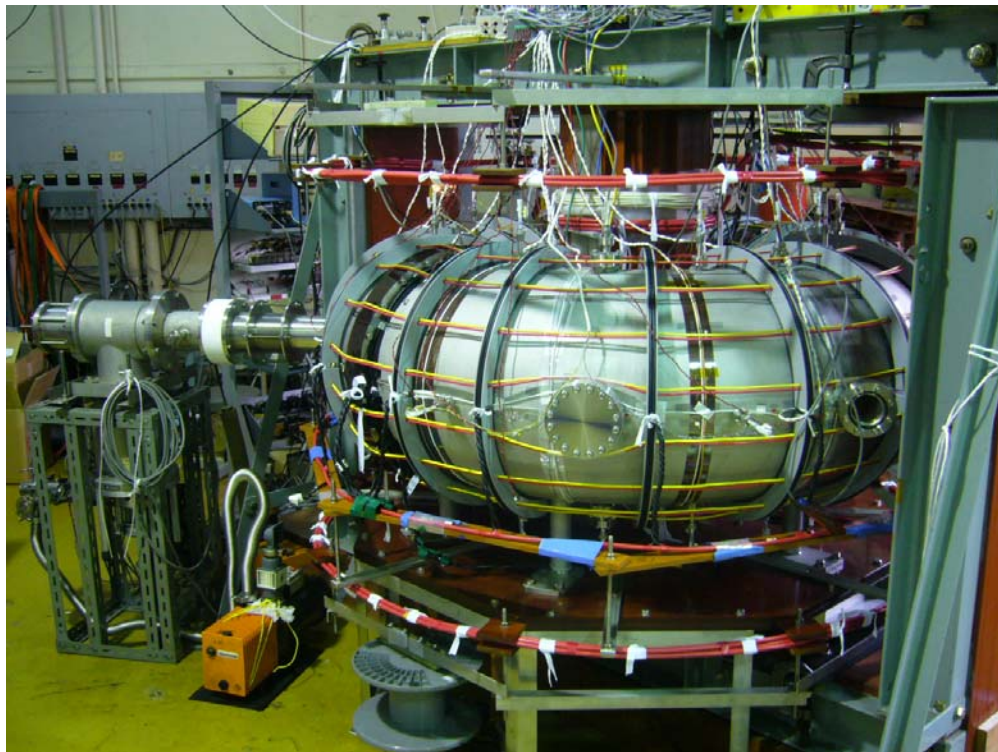
# 実験装置

3

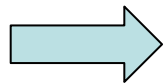
## 低アスペクト比RFP実験装置

### RELAX

(*RE*versed field pinch of *L*ow *A*spect ratio *eX*periment)



- 大半径 = 50.8cm
- 小半径 = 25.4cm
- アスペクト比  $A=2$   
→ RFP装置としては**世界最小**
- 円形断面
- 壁: 4mm厚、SUS製
- ポロイダルギャップ × 1



低アスペクト比RFPの特徴を調べるために、  
内部磁場配位を測定

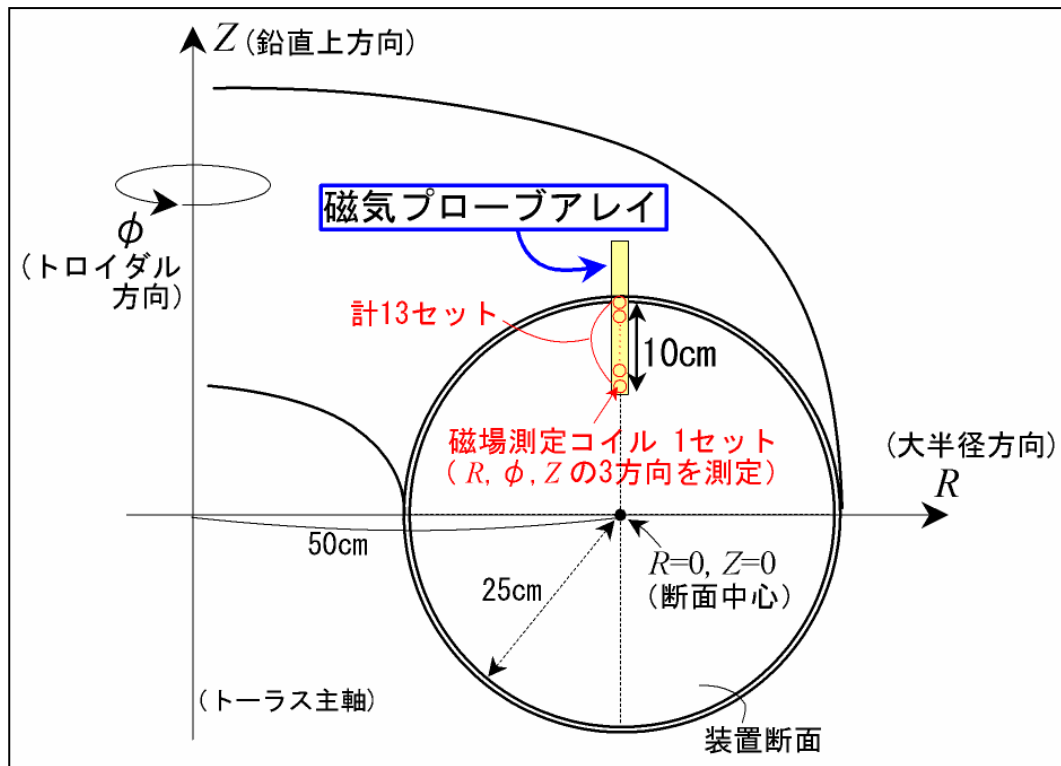
# 磁場配位測定方法

4

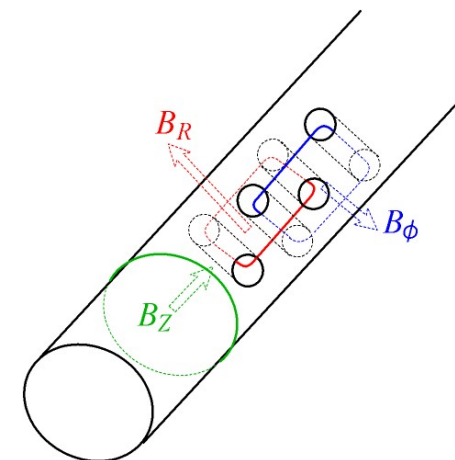
磁場測定コイル(3方向分)が一行に取り付けられている  
磁気プローブアレイを上からRELAXの中へ約10cm挿入

(計13箇所の磁場を測定)

磁場配位の時間発展を  
直接的に測定



磁気プローブアレイの写真(上)  
とコイル1セットの図(下)



# 磁場配位測定結果(1)

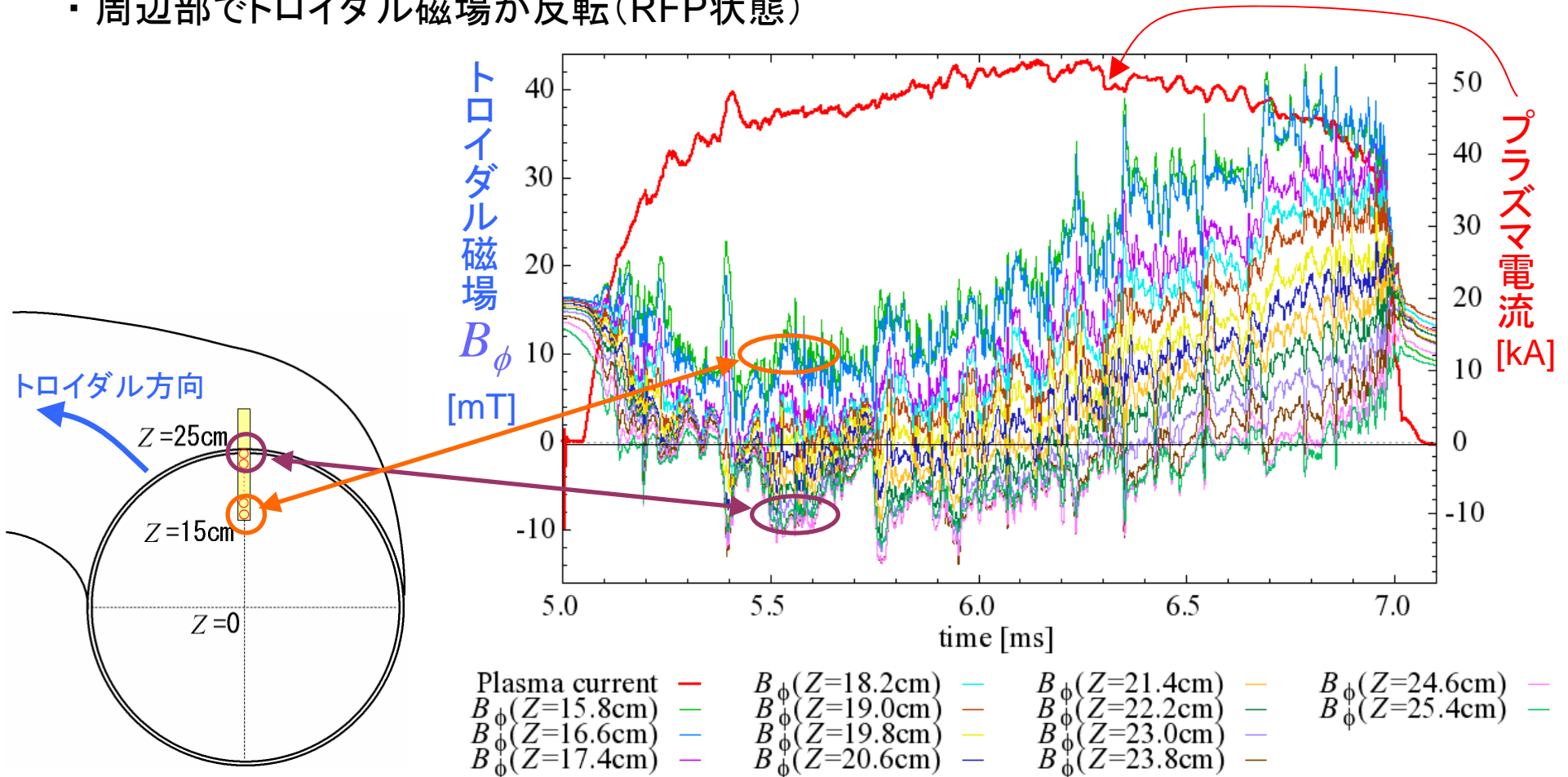
## 典型的なRFP放電

～トロイダル磁場～

放電持続時間: 約2ms

プラズマ電流: 約50kA

- ・ 内部( $Z$ が小さい)ほどトロイダル磁場が大きい
- ・ 周辺部でトロイダル磁場が反転(RFP状態)

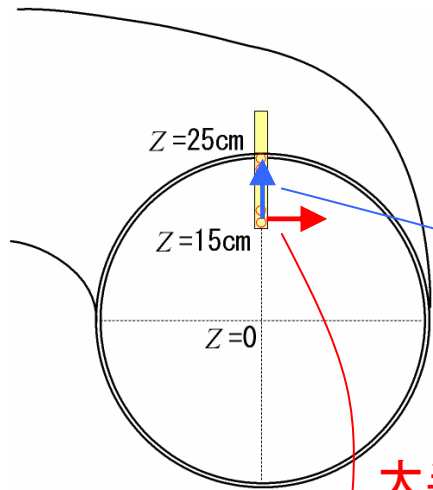




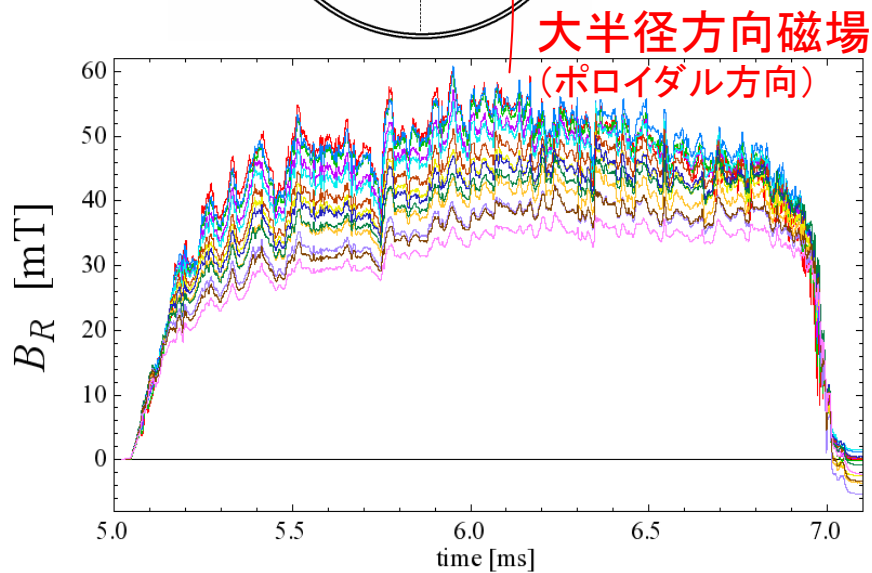
# 磁場配位測定結果(2)

## 典型的なRFP放電

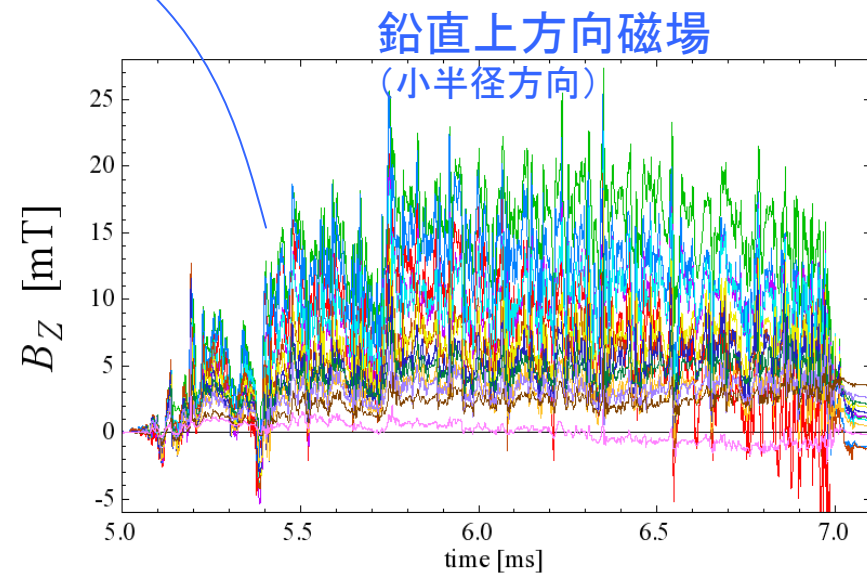
～大半径方向・鉛直上方向磁場～



(測定した範囲において)基本的に磁場の値が周辺部で小さく、内部で大きい



Z [cm]									
15.5	17.1	18.8	20.4	22.0	23.6	25.2			
16.3	18.0	19.6	21.2	22.8	24.4				

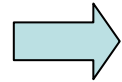


Z [cm]									
15.7	17.3	18.9	20.5	22.1	23.7	25.3			
16.4	18.1	19.7	21.3	22.9	24.4				

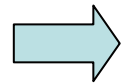
# 平衡再構成コードによる解析(1)

7

## 平衡再構成コード「RELAXFit」

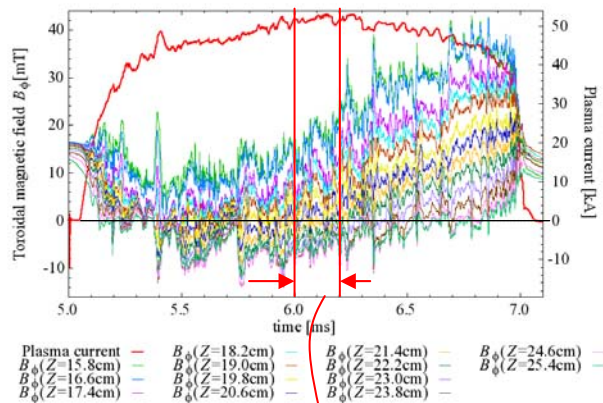


トロイダル方向についての一様性を仮定し、測定した平衡磁場にフィッティングするような**プラズマ内部全体(断面全体)の平衡配位**を、グラド-シャフラノフ方程式を解いて求める

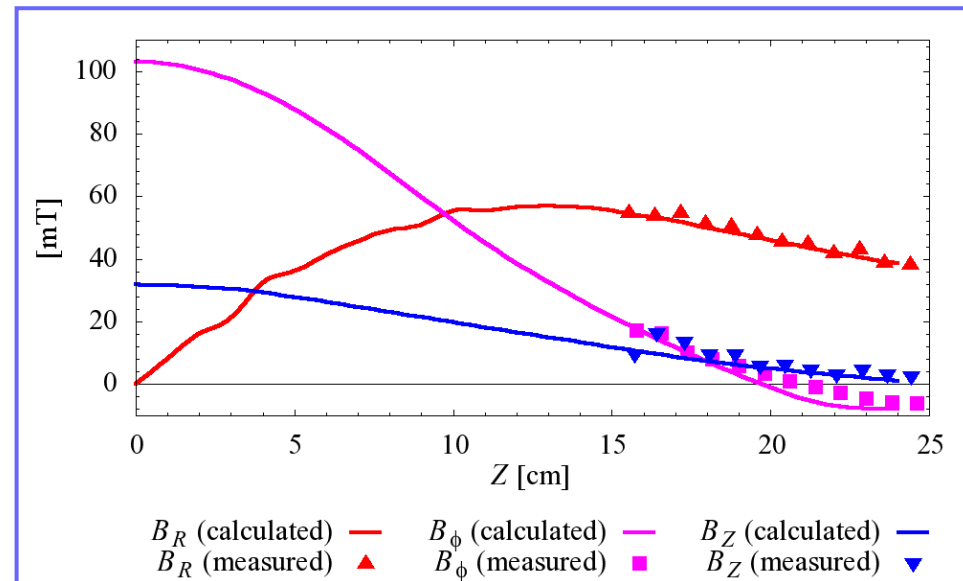


測定していない場所の磁場も知ることができる。

(典型的なRFP放電の測定結果)



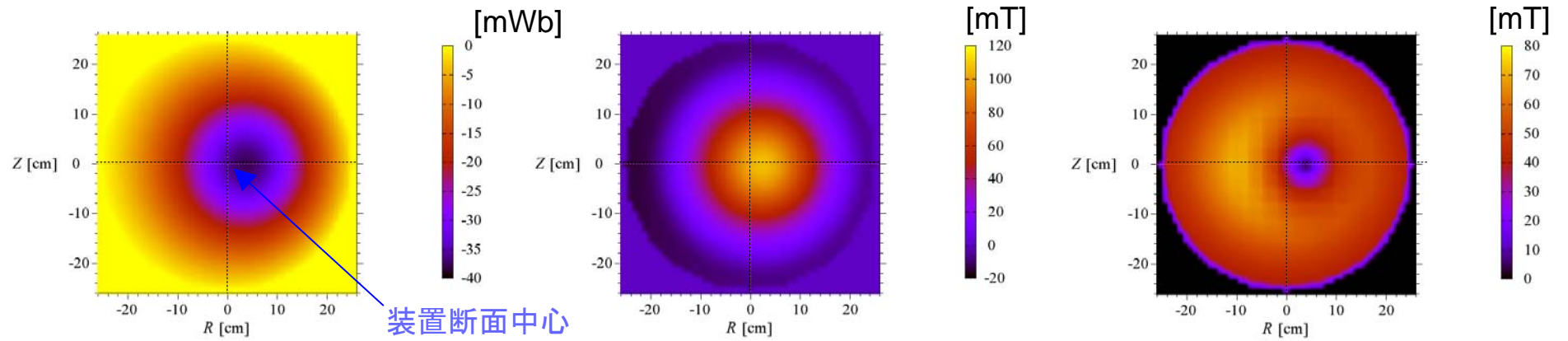
この時間における平衡磁場(時間平均)とフィッティング



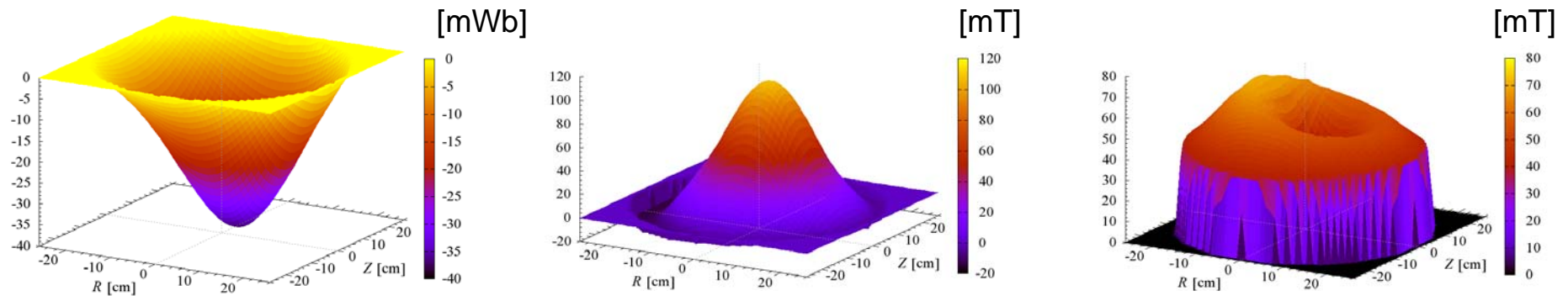
点: 実測値  
実線: コードによる計算値

# 平衡再構成コードによる解析(2)

(前ページで)フィッティングした平衡磁場配位の断面分布



装置断面中心



磁気面関数  
(ポロイダル磁束  $\psi$ )

トロイダル磁場

ポロイダル磁場  
(磁場の、トロイダル方向と  
垂直な方向成分)

- ・ 磁気軸が装置断面中心より約4cm外側へシフト
- ・ トロイダル磁場の反転している領域が内側ほど広い
- ・ 内側のポロイダル磁場が外側より約1.6倍大きい



強いトロイダル効果  
(低アスペクト比)



# 磁場配位測定結果(3)

## 特徴的な放電

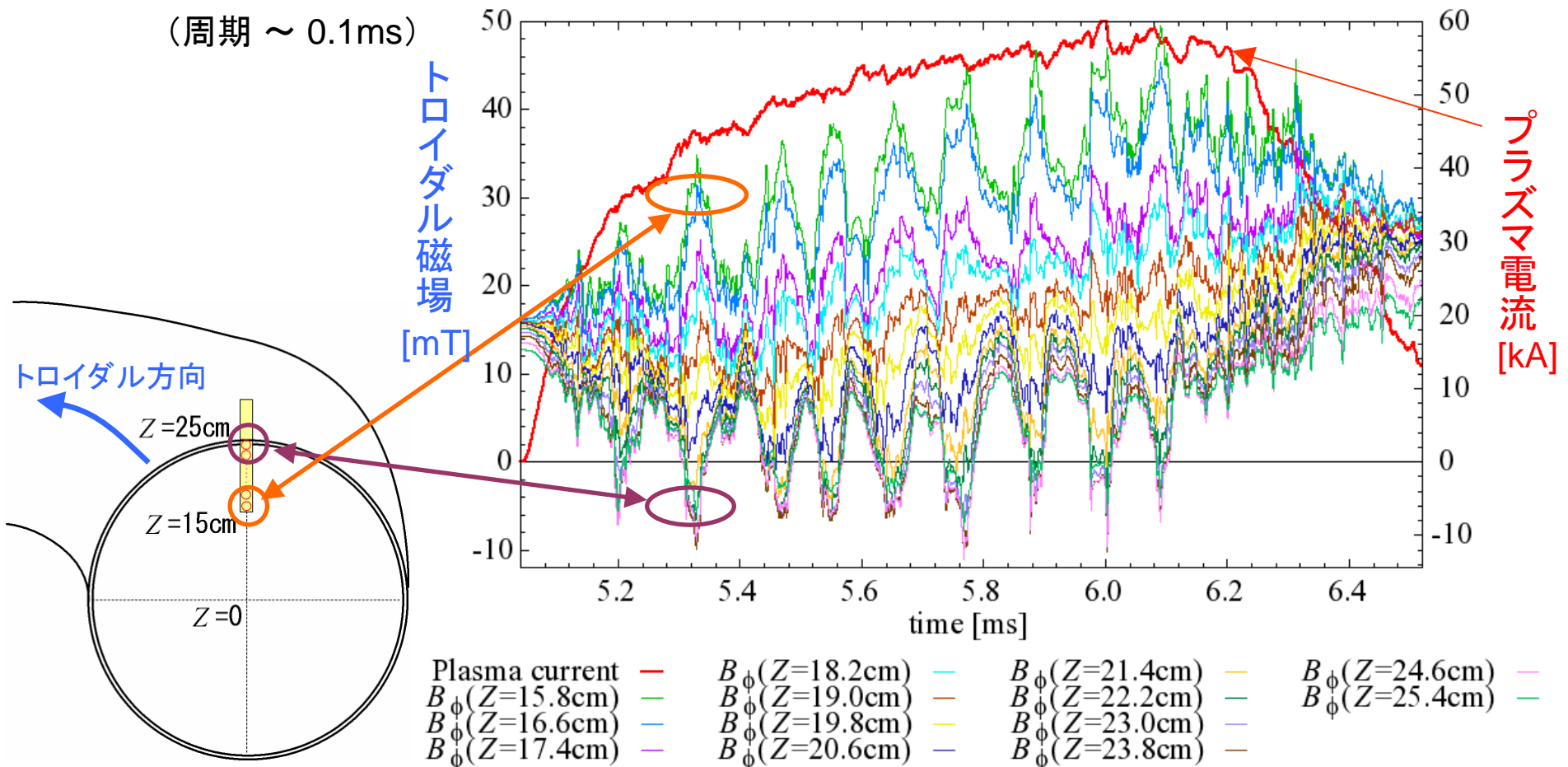
～トロイダル磁場～

- ・時間的に急激かつ大きく分布が変動(振動)し、反転と非反転を繰り返している。

約10kHz

(周期 ~ 0.1ms)

従来のRFP装置には見られなかった現象



# 磁場配位測定結果(4)

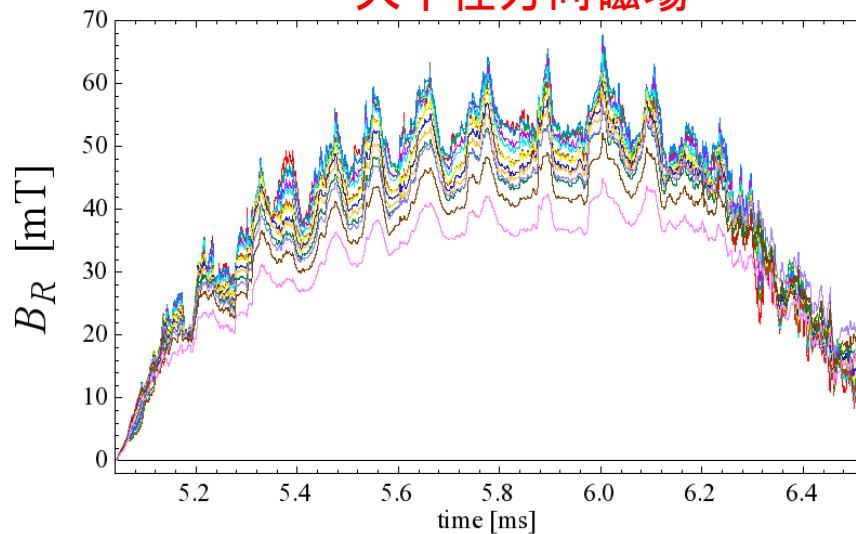
10

## 特徴的な放電

～大半径方向・鉛直上方向磁場～

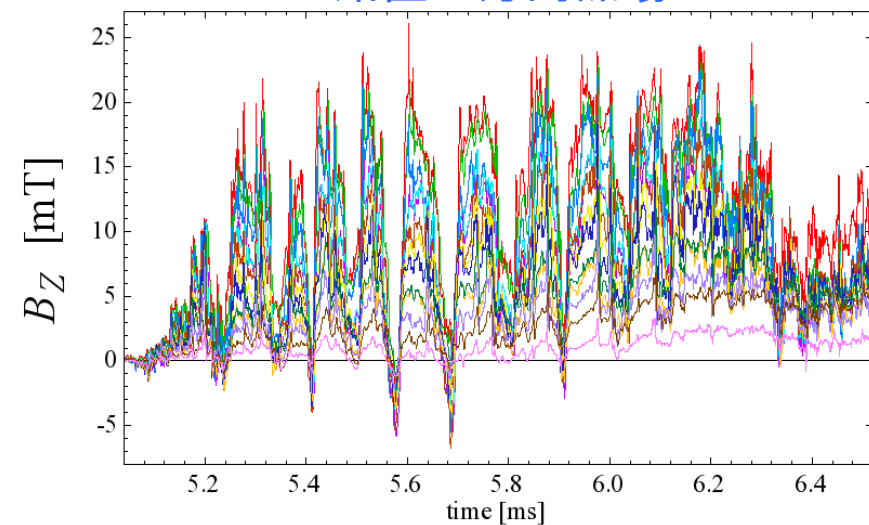
- ・大半径磁場も鉛直上方向磁場も、時間的に急激かつ大きく変動(振動)  
→ トロイダル磁場とほぼ同じ周期(～0.1ms → ～10kHz)

大半径方向磁場



Z [cm]									
15.5	17.1	18.8	20.4	22.0	23.6	25.2			
16.3	18.0	19.6	21.2	22.8	24.4				

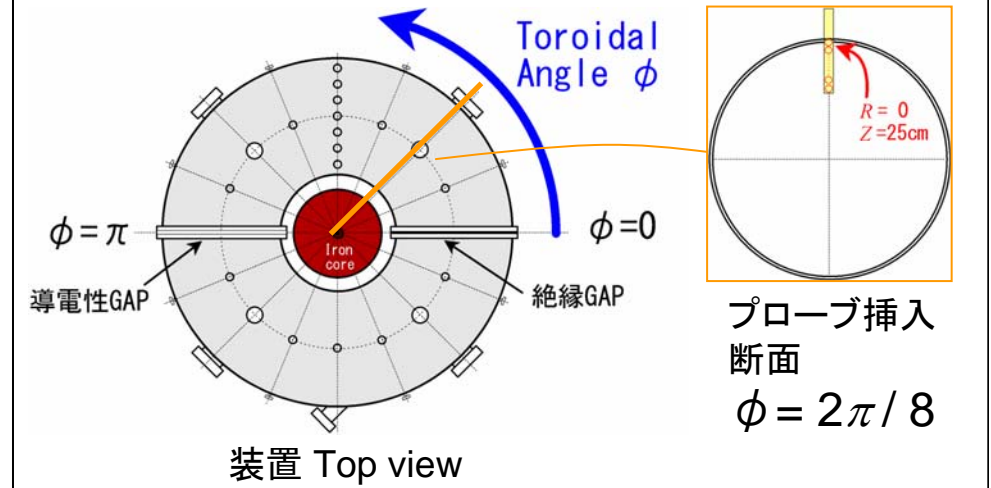
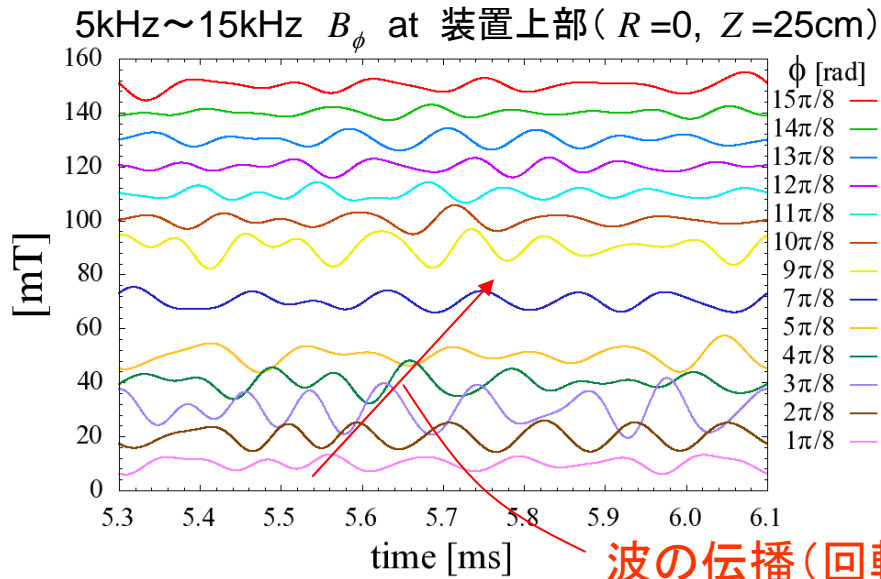
鉛直上方向磁場



Z [cm]									
15.7	17.3	18.9	20.5	22.1	23.7	25.3			
16.4	18.1	19.7	21.3	22.9	24.4				

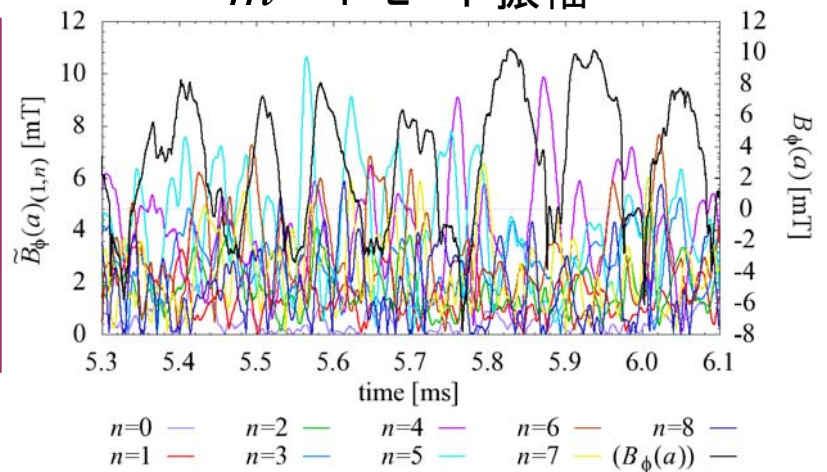
このような大きな振動現象は一体何なのか？ → 解析・考察

# 振動現象の解析(1)



( $m$ :ポロイダルモード数、 $n$ :トロイダルモード数)

$m = 1$  モード振幅



## 各壁位置でのトロイダル磁場

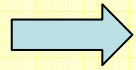
- 5k-15kHz成分 → 大きい振幅(~5mT)で振動し、位置によって位相がずれている(非軸対称)
- $m=1$ モードの揺動 → 一時的にほぼ一つのトロイダルモード( $n=4$  or  $5$ )が大きく(~10mT)成長

## 推測

磁場構造が「ヘリカルに変形する」and/or「ヘリカル構造が回転する」ことで、分布が大きく振動しているように観測されたのではないか

# 振動現象の解析(2)

(前ページの)「推測」に対する検討

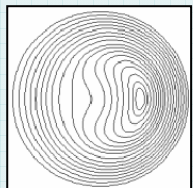


Helical Ohmic State と比較

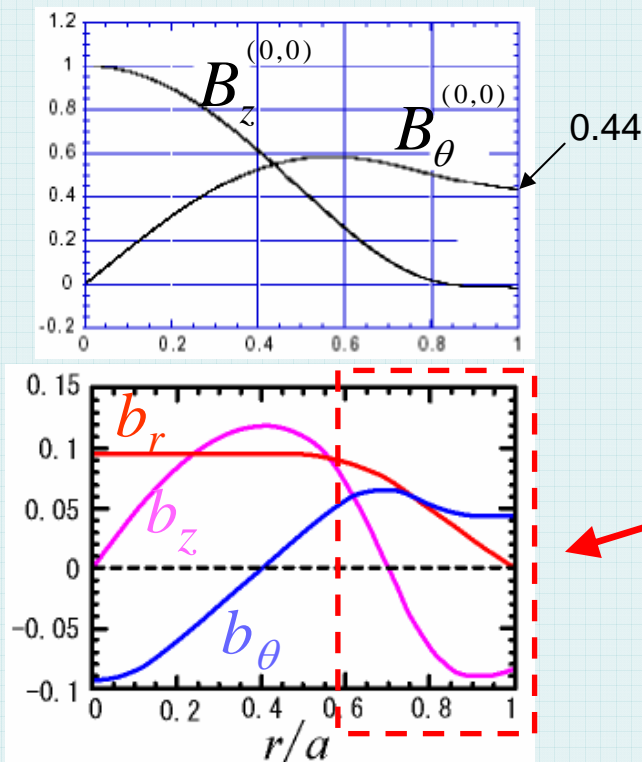
電流駆動+ヘリカル対称

理論

ヘリカル対称円柱モデルの平衡解



円柱断面



R. Paccagnella, IEA / RFP Workshop 2000

$$B = B^{(0,0)} + b$$

軸対称成分    ヘリカル成分

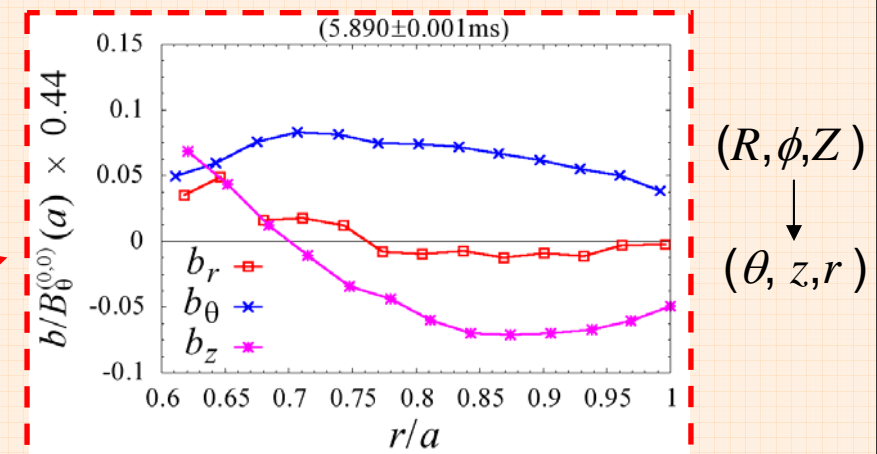
実験測定結果

$B^{(0,0)}$  → 2kHz以下の成分 と仮定

$b$  →  $b = B - B^{(0,0)}$  より計算



規格化小半径分布



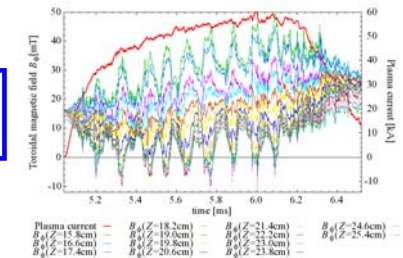
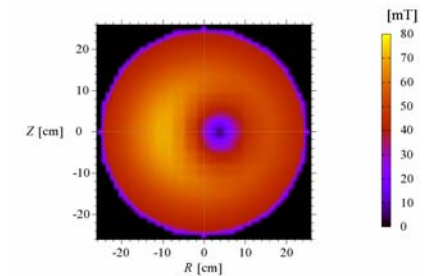
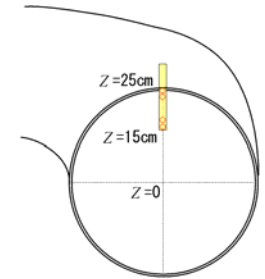
良く一致 →

分布の変動はヘリカル変形によるものという可能性を示唆

# まとめ

13

- ✓ 低アスペクト比RFPの特徴を調べるために、内部磁場構造を研究
- ✓ 磁気プローブアレイにより、低アスペクト比RFPプラズマ内部の磁場配位の時間変化を直接測定
- ✓ 平衡再構成コードにより、測定データに基づくプラズマ内部全体(断面全体)の平衡磁場配位を計算
- ✓ 強いトロイダル効果が表れている平衡磁場配位が得られた  
→低アスペクト比の効果
- ✓ 磁場分布が急激かつ大きく変動(振動)する現象を観測



変動磁場の分布が Helical Ohmic State の平衡解と良く一致

内部磁場構造がヘリカルに変形している可能性を示唆

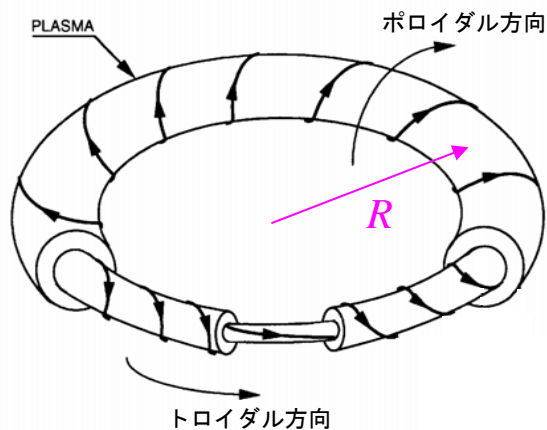
・・・「低アスペクト比RFPは準シングルヘリシティ(QSH)状態になりやすい」という理論予測と関連があると考えられる



## 磁場閉じ込め方式RFP (Reversed Field Pinch)

・トーラス型真空容器    ・螺旋状磁力線

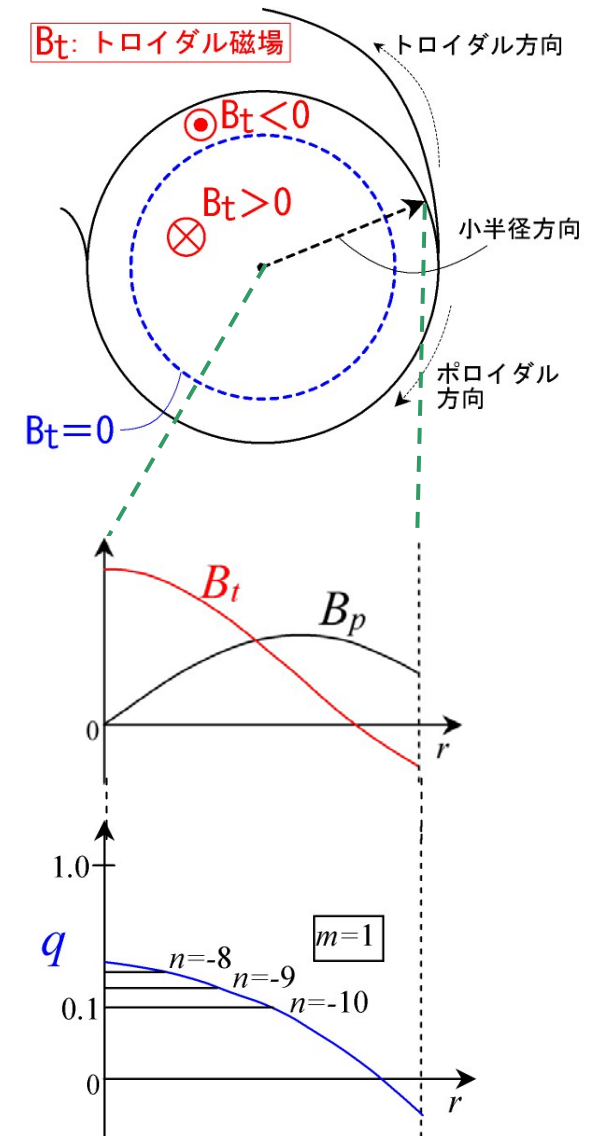
- ・周辺部でトロイダル磁場の向きが反転
- ・ポロイダル磁場がトロイダル磁場と同程度の大きさ
  - 安全係数  $q$  が1より小さい
  - $m=1$  (キンク) モードが主要な不安定性モード
- ・Taylorの理論 (1974)
  - RFPの磁場配位: 磁気エネルギー最小の状態 (条件: 磁気ヘリシティ一定)
  - プラズマが自発的にこの状態に落ち着く (緩和現象)



$$q = \frac{rB_t}{RB_p}$$

$m$ : ポロイダルモード数  
 $n$ : トロイダルモード数

$$q = -\frac{m}{n} \text{ : モード有理面}$$



# Appendix B

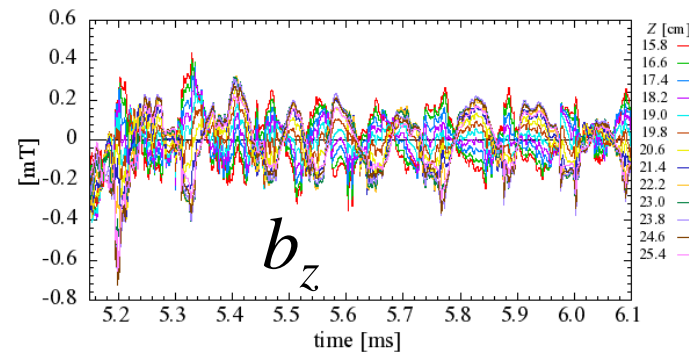
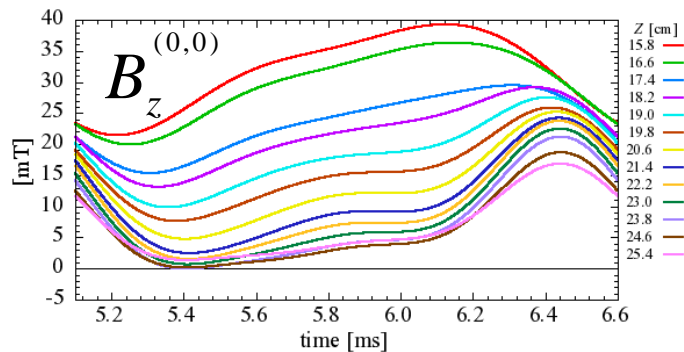
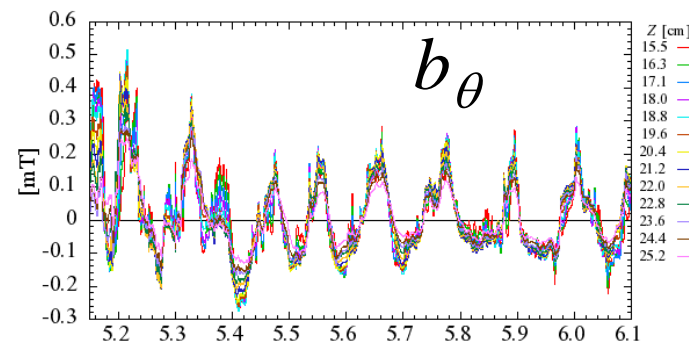
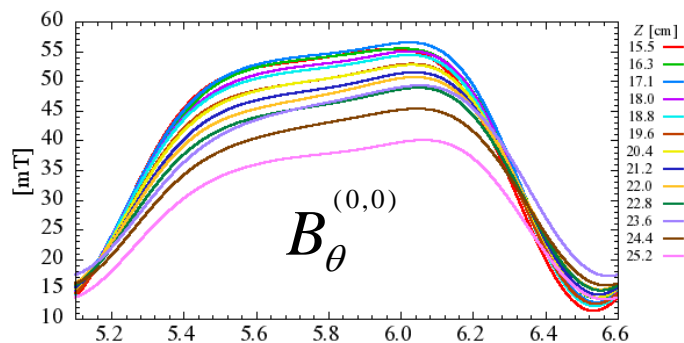
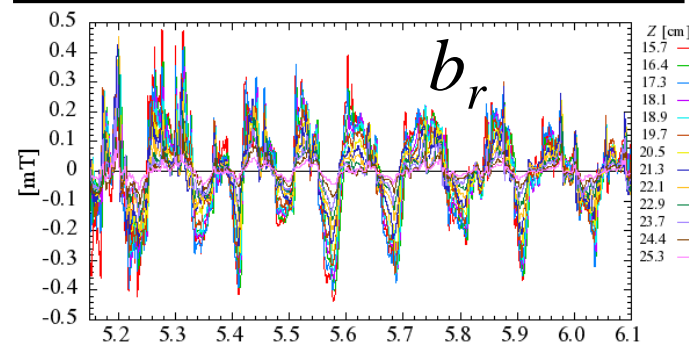
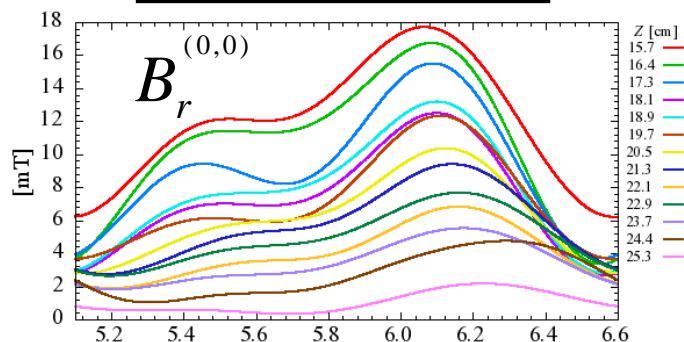
特徴的な放電(振動現象)

測定磁場

$$B = B^{(0,0)} + b$$

2kHz以下の成分

2kHz以下の成分を引いたもの



# Appendix C

トロイダル方向に一様

$$\frac{\partial}{\partial \phi} = 0$$

平衡の式  
(force balance)

$$\nabla p = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

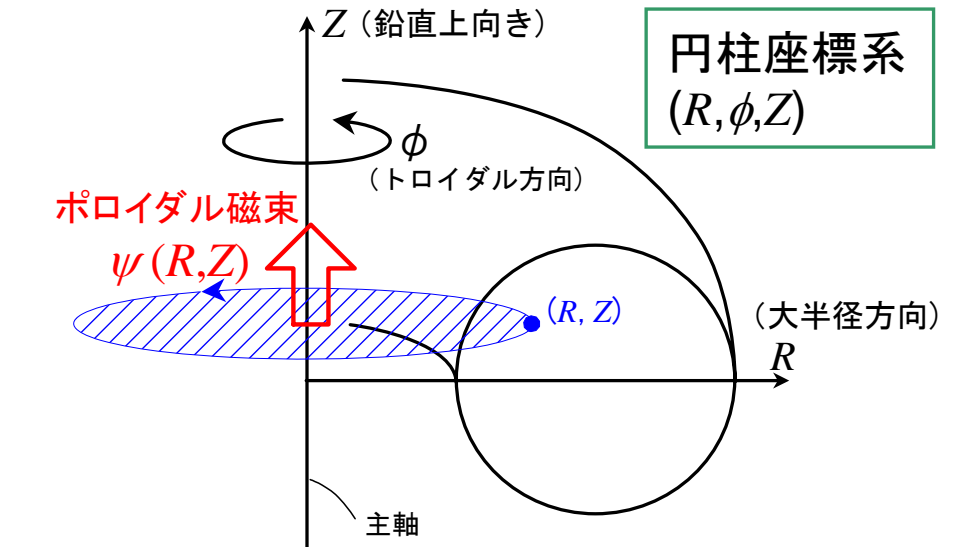
$$\Delta^* \psi = -\mu_0 R^2 \frac{dp}{d\psi} - F \frac{dF}{d\psi}$$

$$\Delta^* \equiv R \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2}{\partial Z^2}$$

$\psi \equiv RA_\phi$  ポロイダル磁束 (磁気面関数)

$F \equiv RB_\phi = F(\psi)$

$p = p(\psi)$  圧力



グラドーシャフラノフ方程式

$$\mathbf{B} = -\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \mathbf{e}_R + \frac{F}{R} \mathbf{e}_\phi + \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} \mathbf{e}_Z$$

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0 R} \left( -\Delta^* \psi \mathbf{e}_\phi + \nabla F \times \mathbf{e}_\phi \right)$$