

# 外部回転摂動磁場を用いた RFPプラズマの 抵抗性不安定性制御

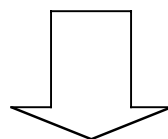
第8回 若手科学者によるプラズマ研究会

京都工芸繊維大学

三瓶明希夫

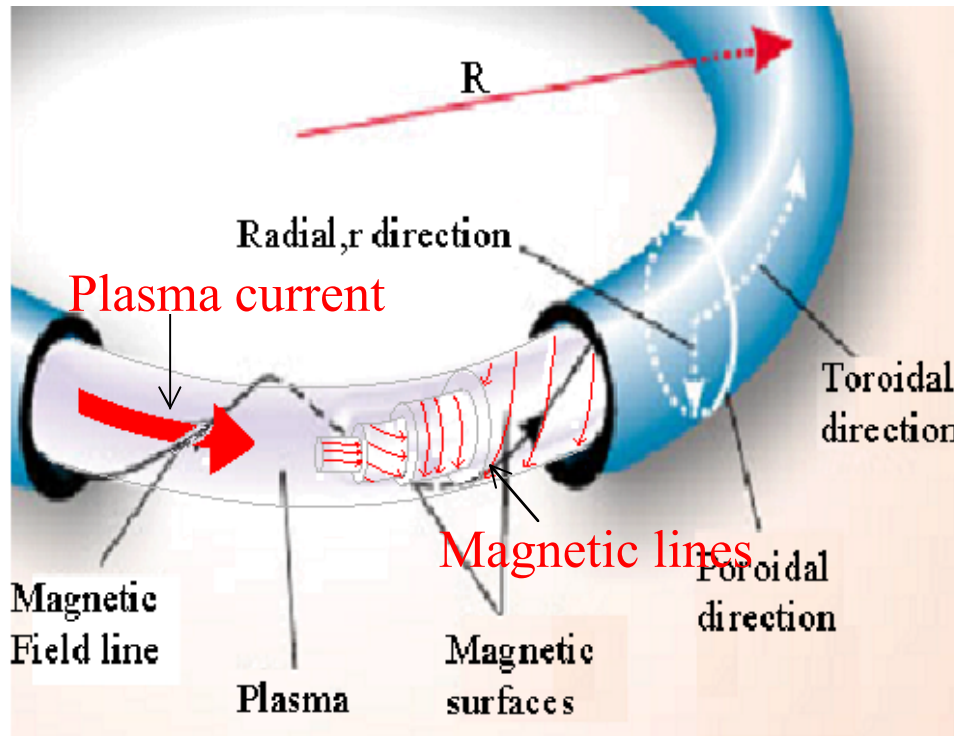
# 背景と目的

- ・ 逆磁場ピンチ(RFP)においてはテアリングモードによる摂動磁場が引き起こす異常輸送の抑制が重要課題の一つ
- ・ 抵抗性壁を用いたRFPプラズマでは、支配的なテアリングモードは回転していない
- ・ テアリングモードは、抵抗性壁の条件であってもプラズマが回転すれば成長を抑制できる



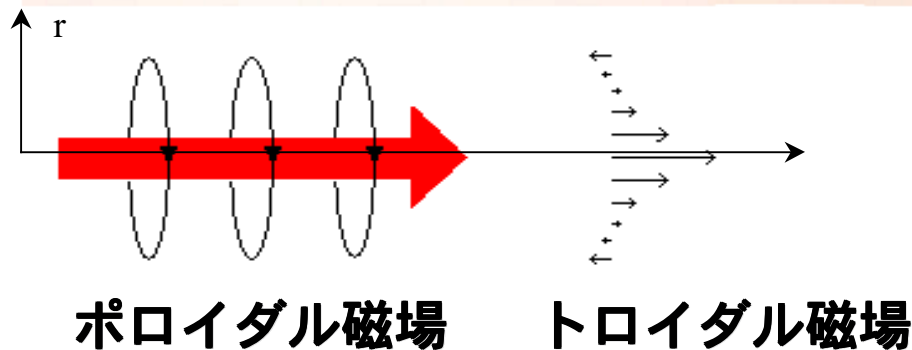
- ・ 外部からテアリングモードと共鳴する回転磁場を加えることによりモードにトルクを与え、回転を駆動する

# 逆磁場ピンチ(RFP)



逆磁場ピンチ(RFP)は軸対称トーラスで、トロイダル磁場とプラズマ電流によるポロイダル磁場を利用したプラズマ閉じ込め方式。

トロイダル磁場が内と外で逆転してるのが特徴。



# RFPにおける抵抗性不安定性

- ・ 抵抗性壁に囲まれたプラズマでは、壁上に不整磁場が生じ、テアリングモードと相互作用することで、プラズマを減速させるトルクを発生させる
- ・ プラズマの回転が遅いとテアリングモードが成長し、閉じ込め劣化が起こる

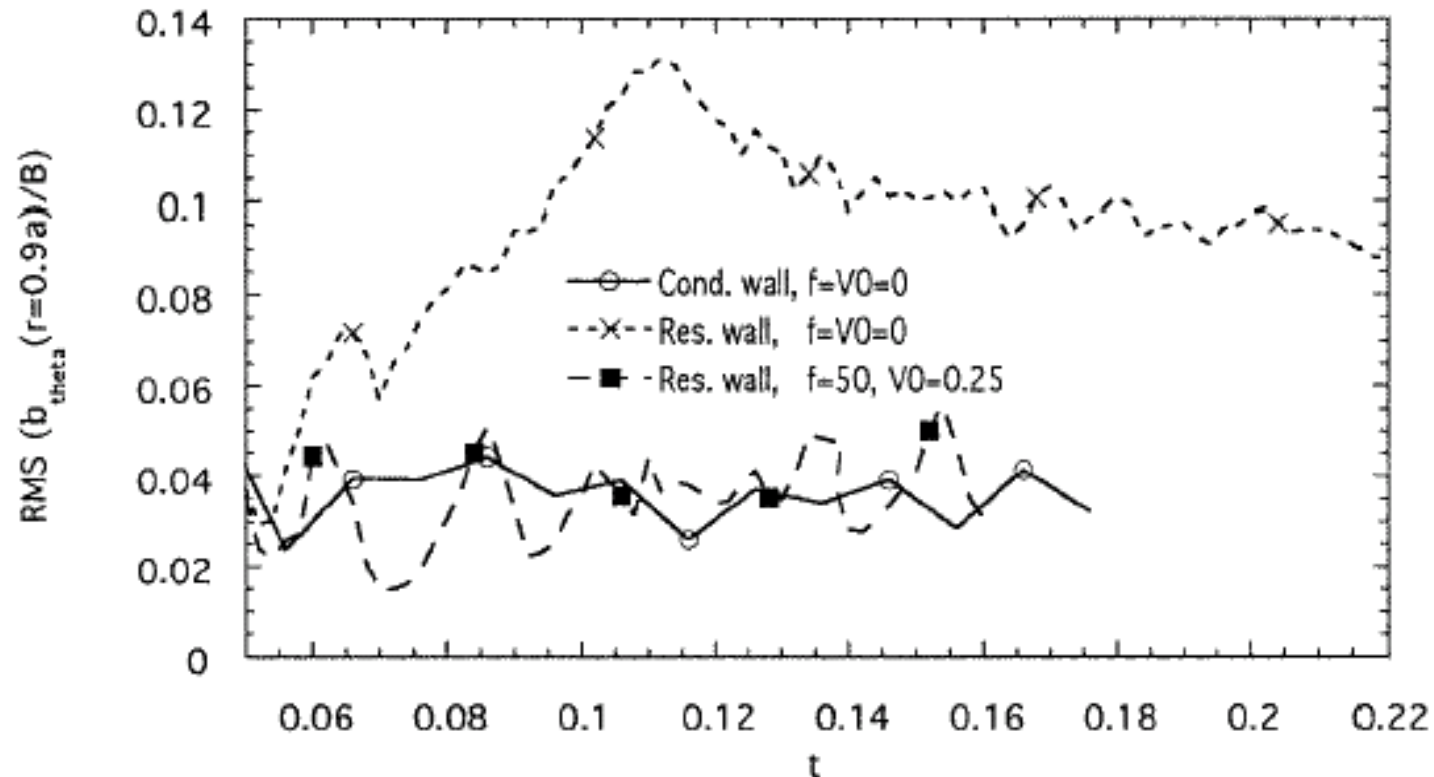


磁気島の形成



# 抵抗性壁条件での計算結果

- 完全導体壁の条件では摂動振幅の成長は抑えられる
- 抵抗性壁の条件では摂動振幅は壁の磁場浸透時間で成長する
- プラズマの流れ(回転)があれば摂動振幅の成長は抑えられる



H-E S  therblom†, D D Schnack† and J R Drake†  
Plasma Phys. Control. Fusion 40 (1998) 1775–1784.

# 実験装置

## Vacuum vessel

Material : SS

Major Radius  $R$  : 0.4 m

Minor Radius  $a$  : 0.1 m

Field Penetration Time : 0.15 ms

Number of Poloidal Gaps : 2

## Toroidal field circuit

Number of coils : 24 (6 turns/coil)

Field intensity < 0.1 T

## Poloidal field circuit

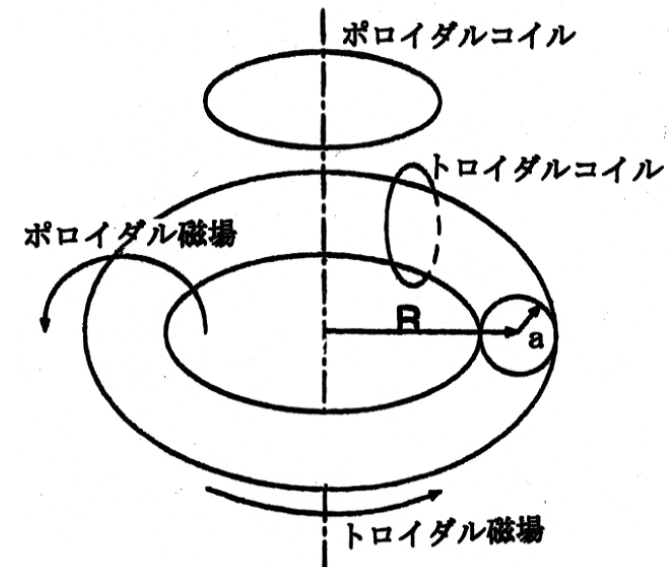
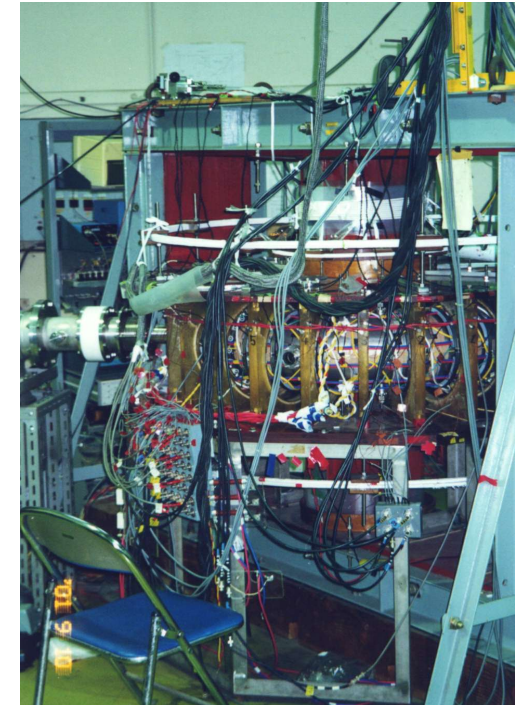
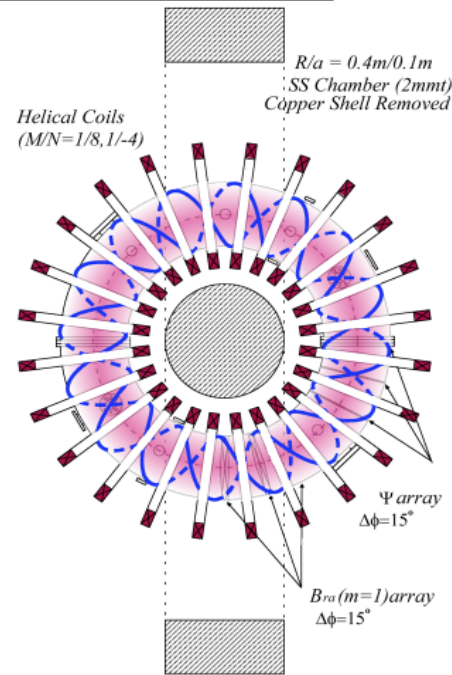
Iron core of 0.3 Vs flux swing

Number of primary turns : 12

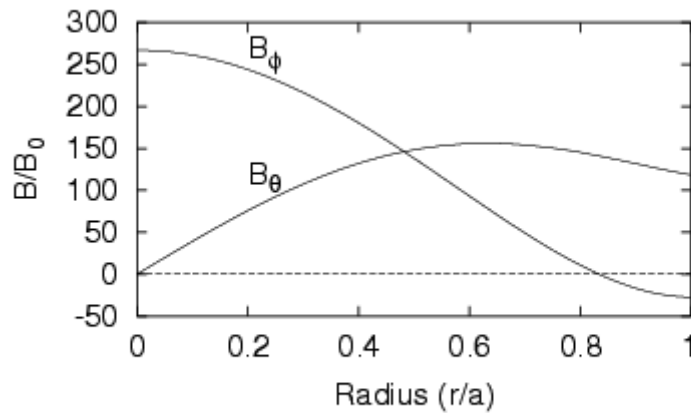
## Helical windings for rotating field

$m=1/n=8$  (core resonant),  $m=1/n=-4$  (nonresonat)

$I_h < 1$  kA ( $10$  kHz  $< f < 25$  kHz)



# モードと共鳴



安全係数  $q(r) = rB_\phi(r) / RB_\theta(r)$

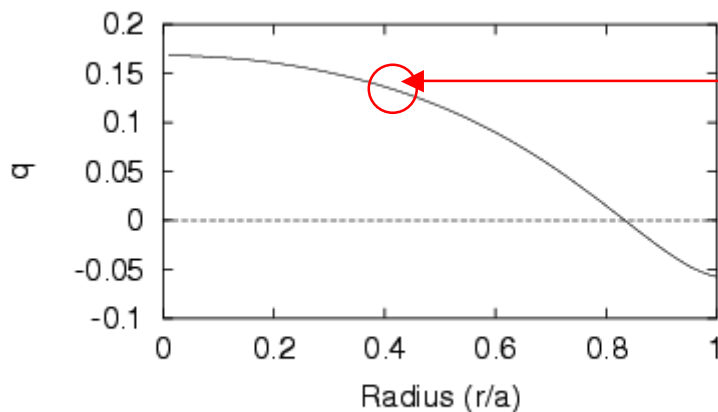
$B_\phi$  : トロイダル磁場  $B_\theta$  : ポロイダル磁場

R : 大半径(0.4m)

摂動磁場の周期  $m$ 、 $n$  に対して

$q(r_s) = m/n$  となる  $r = r_s$  が共鳴面

$m$ : ポロイダルモード数  $n$ : トロイダルモード数



本実験装置では  $q(r_s) = 1/8$  が内部共鳴面として存在する

# モードの測定

- ・ 摂動磁場は、トーラスのトロイダル方向に24ヶ所、放射状に設置した磁場測定用コイル(m=1 sinコイル)で測定する。

摂動磁場

$$\tilde{B}(\theta, \varphi, t) = \sum_{m,n} \left[ \tilde{B}_{mn}^c \cos(k_n \varphi + k_m \theta - \omega_{mn} t) + \tilde{B}_{mn}^s \sin(k_n \varphi + k_m \theta - \omega_{mn} t) \right]$$

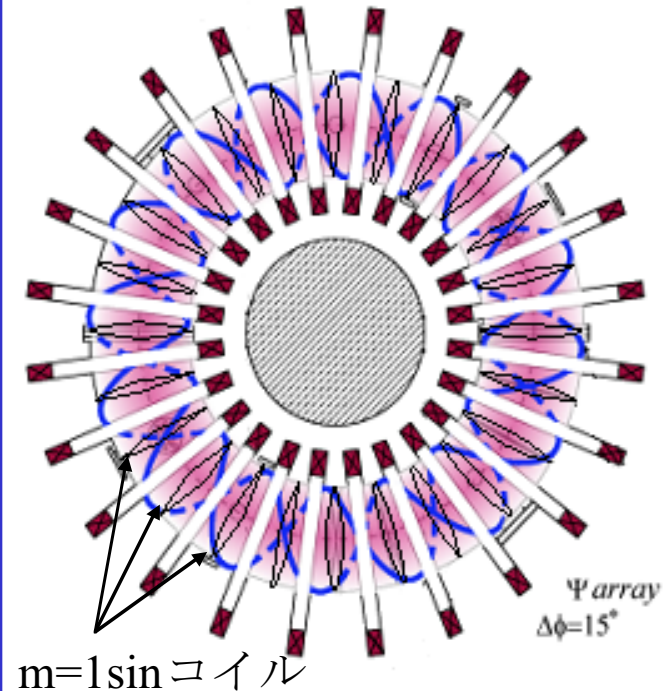
m=1 sinコイルにより測定される摂動磁場

$$\tilde{B}(\varphi, t) = \sum_n |b_{1n}| \sin(k_n \varphi + \omega_n t - \delta_n)$$

トロイダル方向に空間フーリエ変換する

$$\tilde{B}(\theta, \varphi, t) \propto |b_{1n}| \sin(\delta_n - \omega_n t)$$

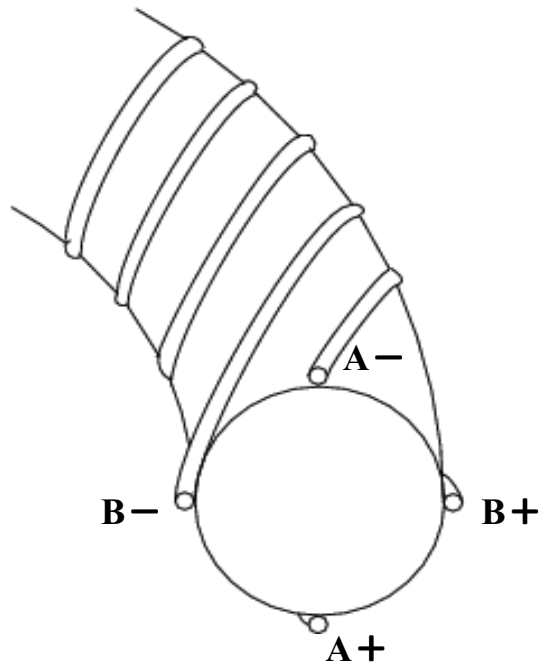
m : ポロイダルモード数  
n : トロイダルモード数



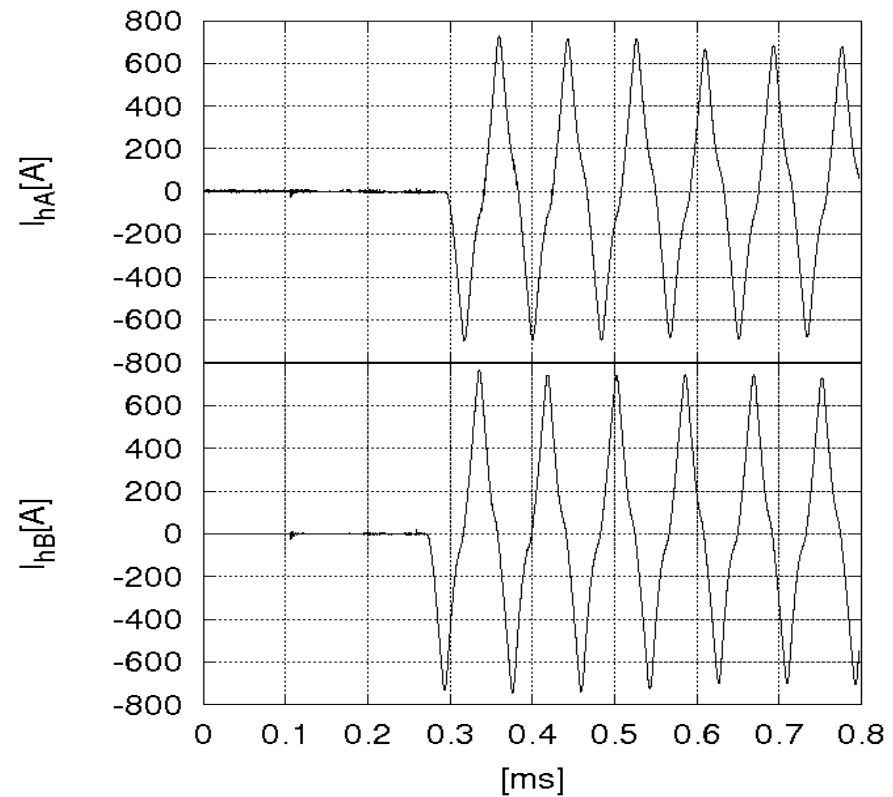
実験装置のTop view

# ヘリカルコイル

- A+とA-に正負の電流を流す  $\Rightarrow$   $m=1$ ヘリカル磁気面に影響
- A、Bに位相差 $90^\circ$ の振動電流を流す  $\Rightarrow$  回転磁場



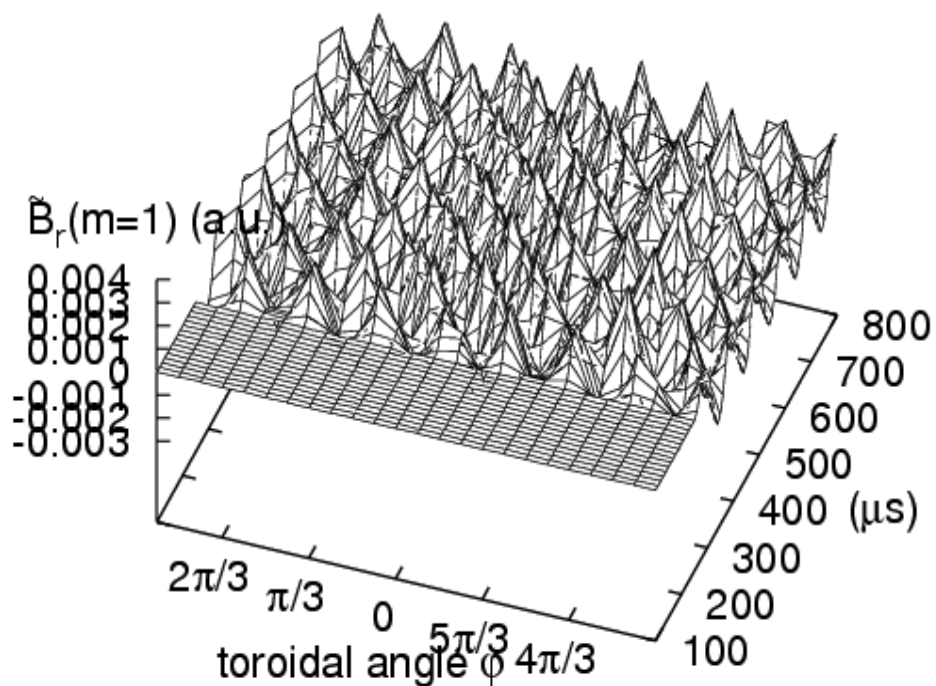
ヘリカルコイル



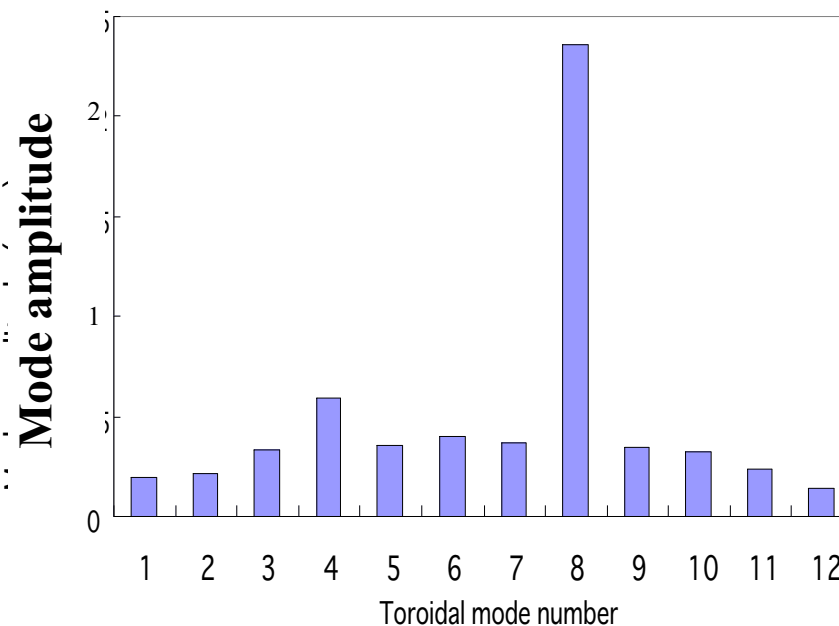
ヘリカル電流

# m=1/n=8回転摂動磁場

- m=1/n=8モードに共鳴する回転摂動磁場 (10-20kHz)を外部から印加する.

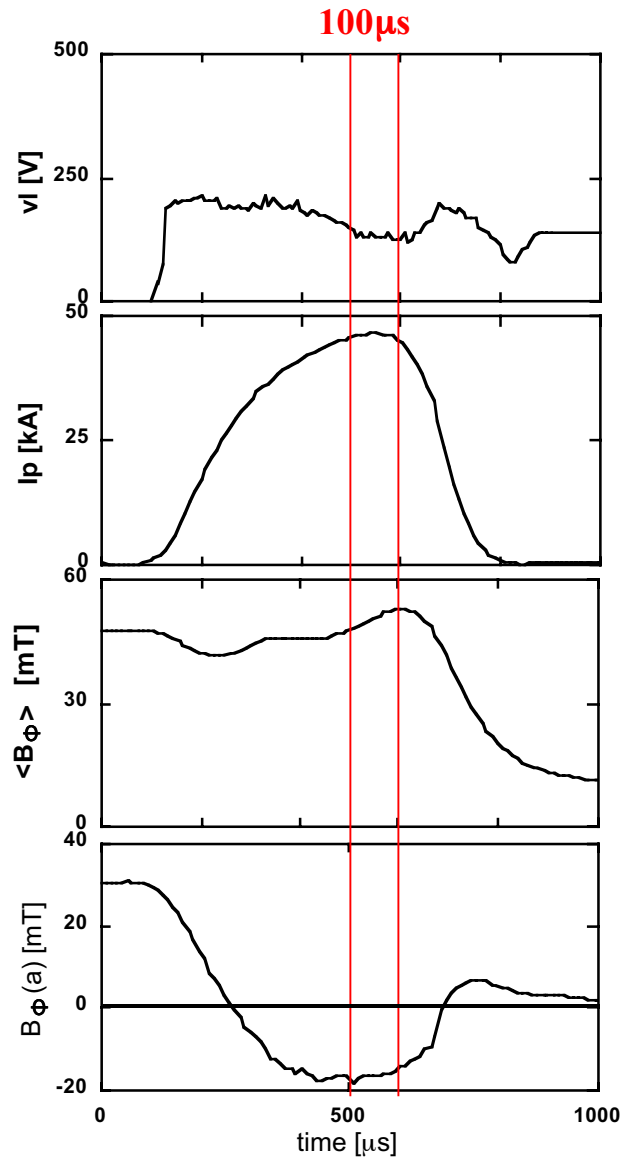


回転摂動磁場の振幅の時間変化



回転摂動磁場 (10kHz) の  
モードスペクトル

# RFPの放電波形



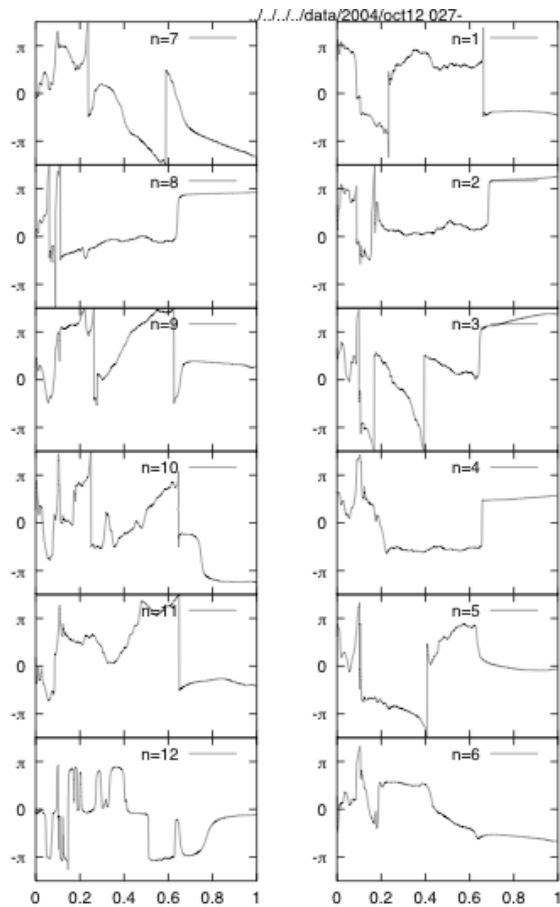
$v_l$ : ループ電圧

$I_p$ : プラズマ電流

$\langle B_\phi \rangle$ : ポロイダル断面で平均した  
トロイダル磁場

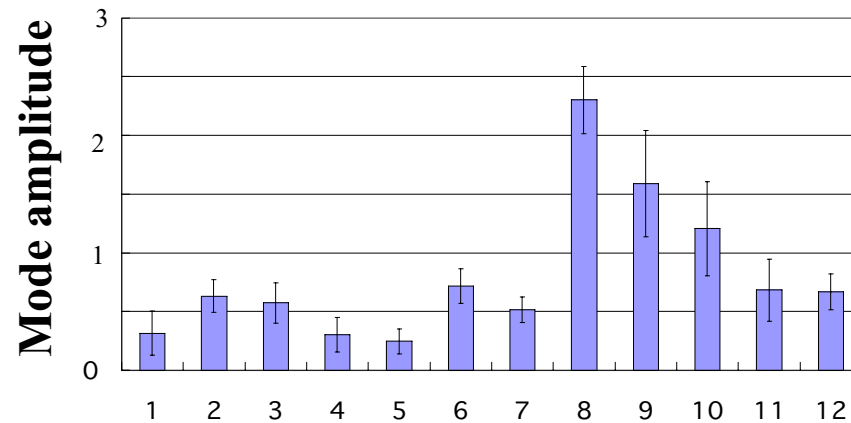
$B_\phi(a)$ : 壁でのトロイダル磁場

# RFPのモード解析



time [ms]

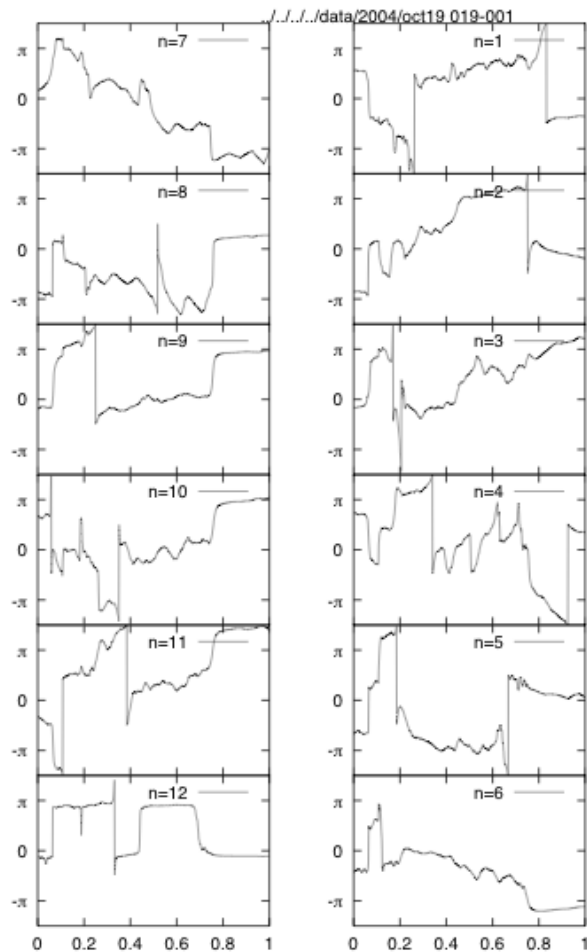
- $m=1/n=8-10$ モードが支配的
- $m=1/n=8$ モードはほとんど回転していない



Toroidal mode number

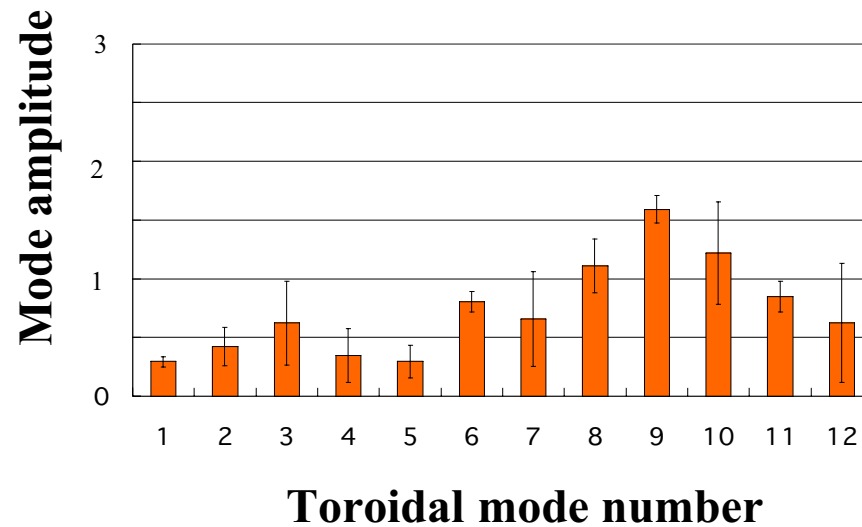


# 回転磁場によりn=8モードは回転する



time [ms]

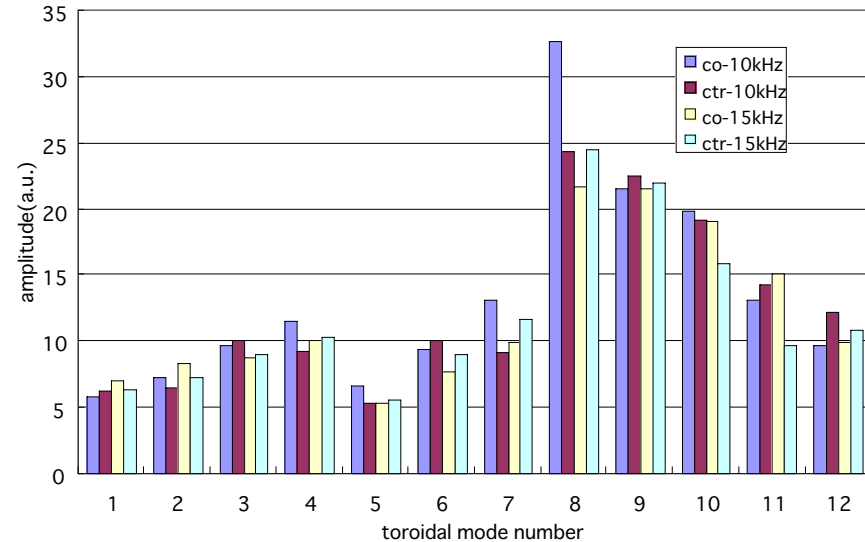
- ・ プラズマ電流と同方向の共鳴回転磁場を加える
  - $m=1/n=8$ モードの回転駆動
  - $m=1/n=7,9$ モードの回転に変化なし
- ・  $m=1/n=8$ モードの摂動振幅が減少した



# 摂動振幅へのヘリカル磁場の影響

外部から支配的なテアリングモード  
に共鳴する回転磁場( $m=1/n=8$ )を印加

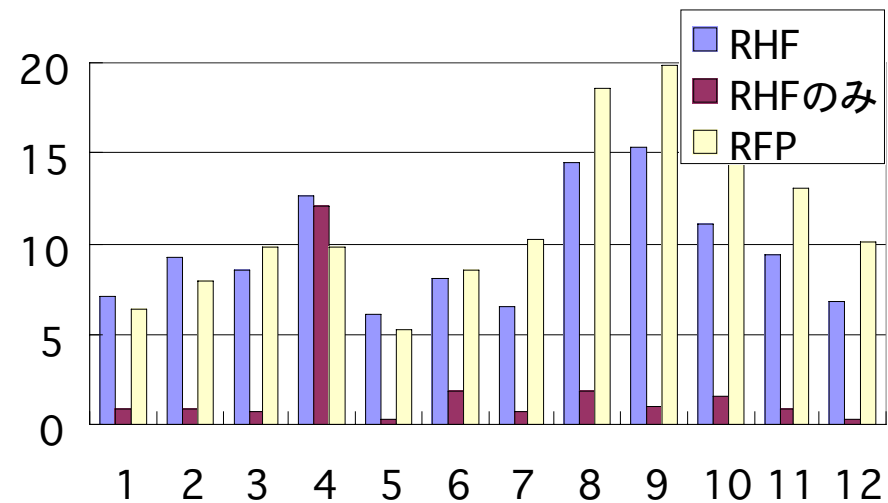
電流方向に回転磁場を加えた場合  
摂動磁場の共鳴モードが回転磁場と  
同方向に回転するショットが見られた  
その時共鳴モードの摂動振幅を抑制できた



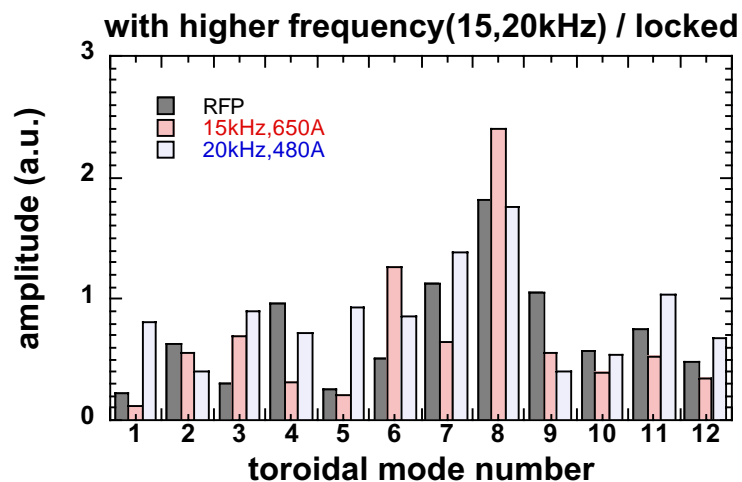
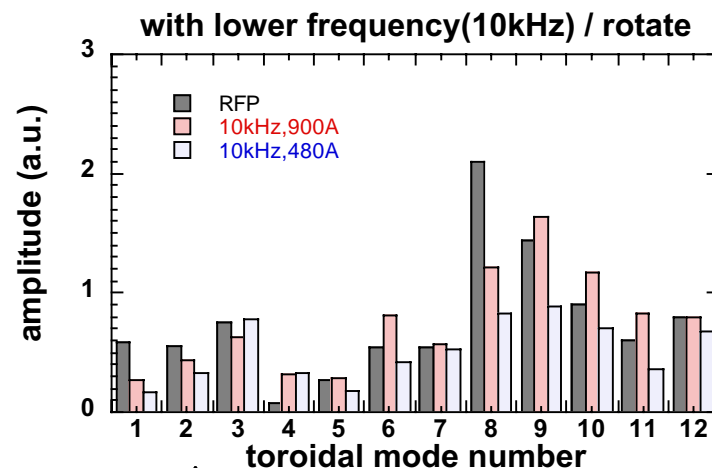
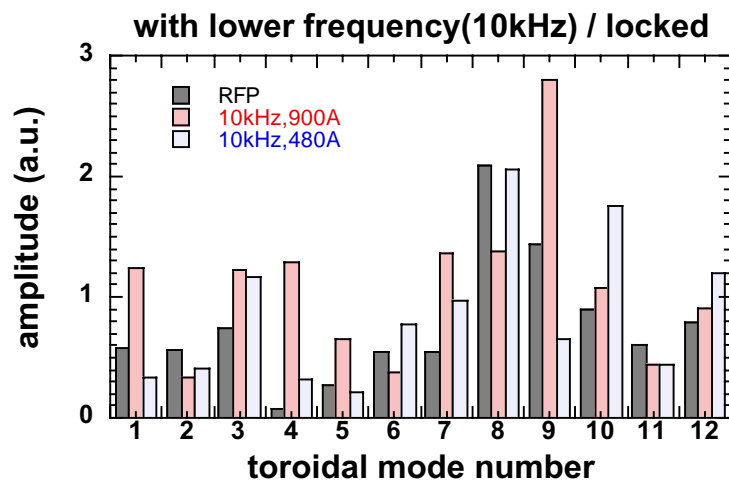
外部からテアリングモードに  
共鳴しない回転磁場を印加

モードの回転は見られなかった

外部摂動磁場の印加によって $m=1/|n|=4$ モード  
の振幅は増大するが、同時に内部共鳴モード  
( $m=1/n=8,9,10$ )の振幅が20-30%程度減少  
している。

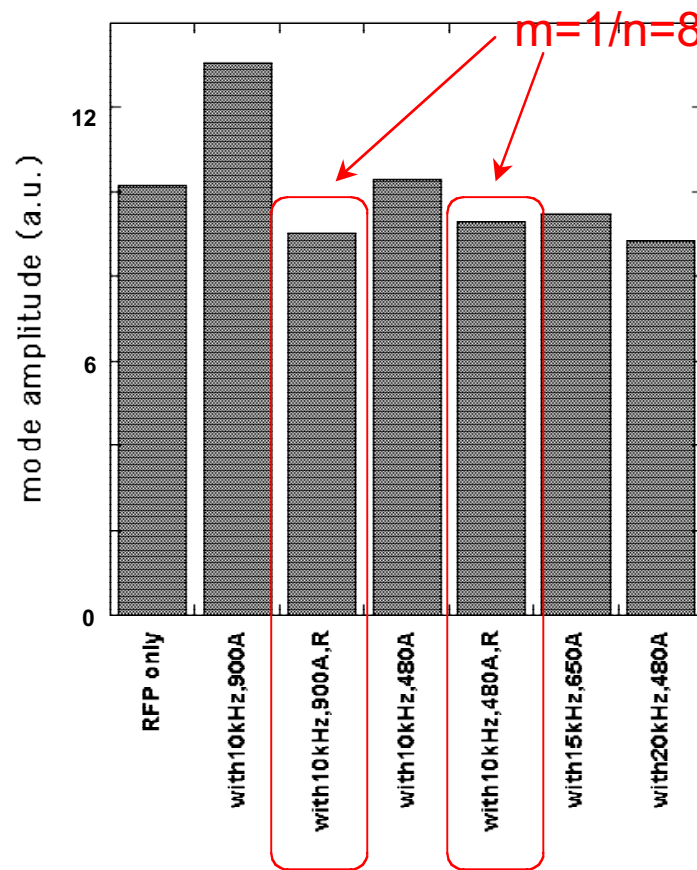


# 摂動振幅へのヘリカル磁場の影響



- 10kHz印加時にモードに回転駆動が見られた
- $m=1/n=8$ モードはモードの回転により摂動振幅がRFPのときより減少する

# ヘリカル磁場による摂動振幅の変化



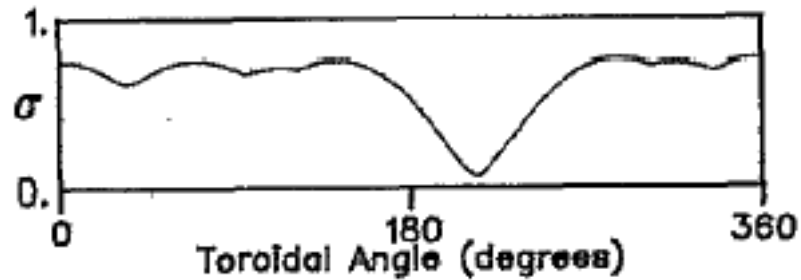
各モードの振幅の総和に有意な差は見られなかった

放電持続時間にも際立った変化は見られなかった

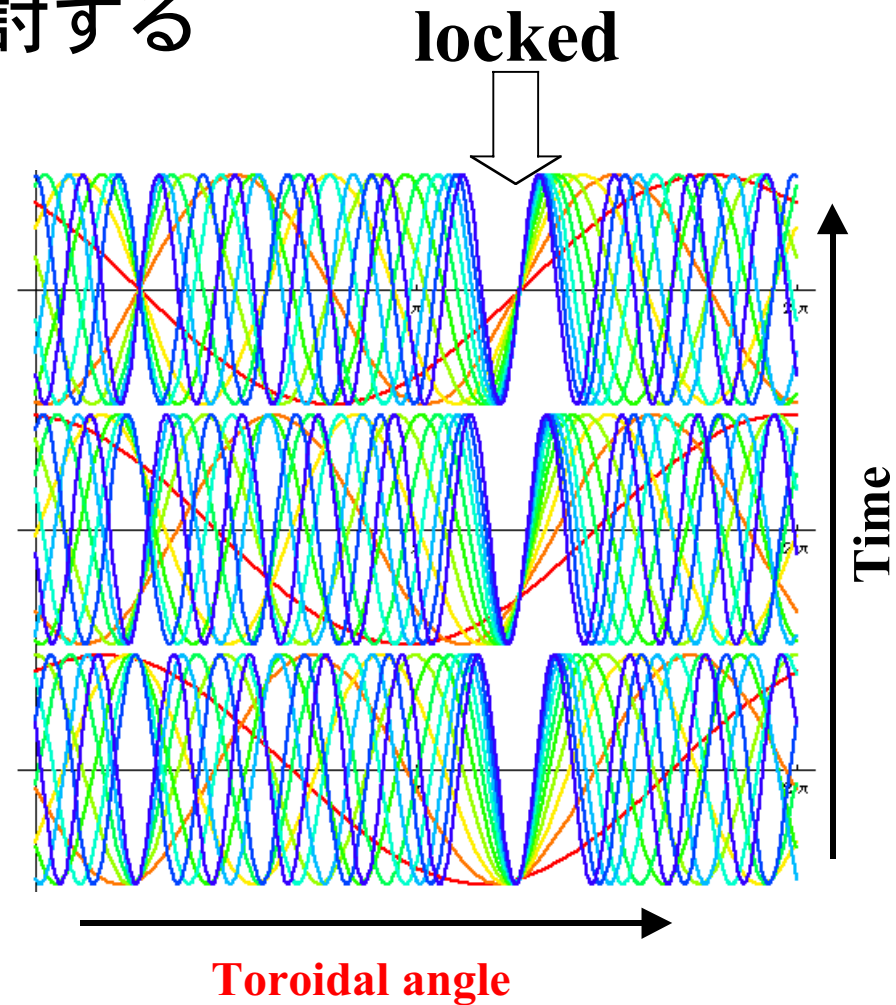
# Phase Alignment

各位相の相関について検討する

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{1}{1 + 2 + \dots + (n_{\max} - n_{\min})} \times \sum_{j=n_{\min}}^{n_{\max}-1} \sum_{k=j+1}^{n_{\max}} \left| \sin \left( \frac{\Phi_{m,j}(\theta, \phi) - \Phi_{m,k}(\theta, \phi)}{2} \right) \right|$$



P. Greene and S. Robertson, Phys. Fluids **B** 5, 550 (1993).

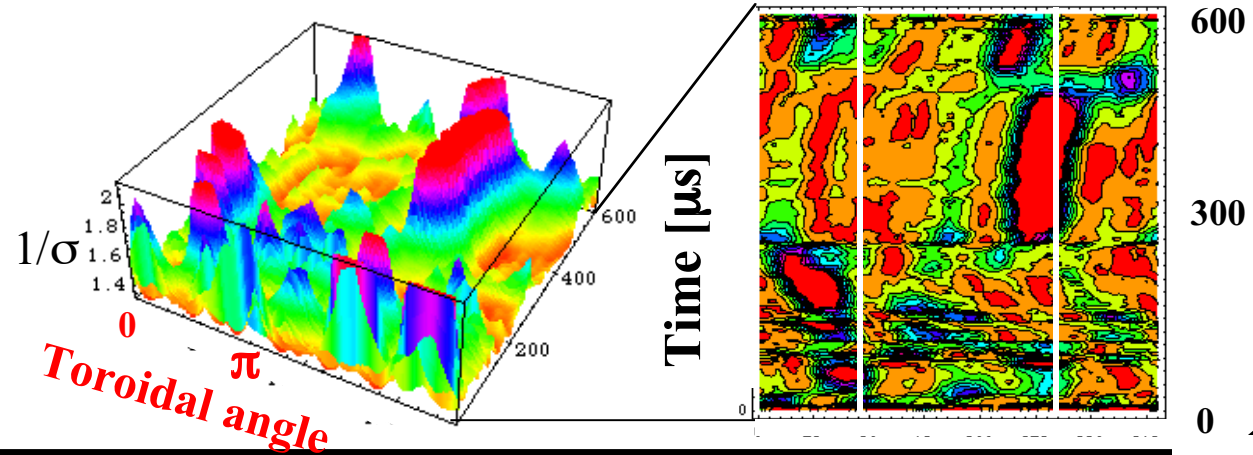


# RFPのPhase Alignment

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{1}{1 + 2 + \dots + (n_{\max} - n_{\min})} \times \sum_{j=n_{\min}}^{n_{\max}-1} \sum_{k=j+1}^{n_{\max}} \left| \sin\left(\frac{\Phi_{m,j}(\theta, \phi) - \Phi_{m,k}(\theta, \phi)}{2}\right) \right|$$

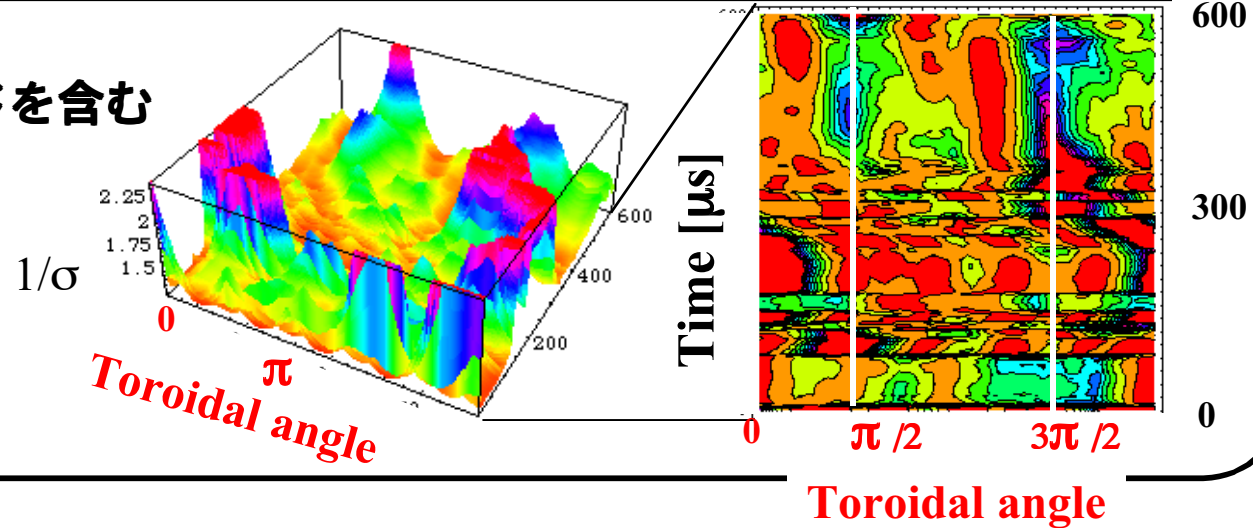
非共鳴モード

$m=1/n=1-7$



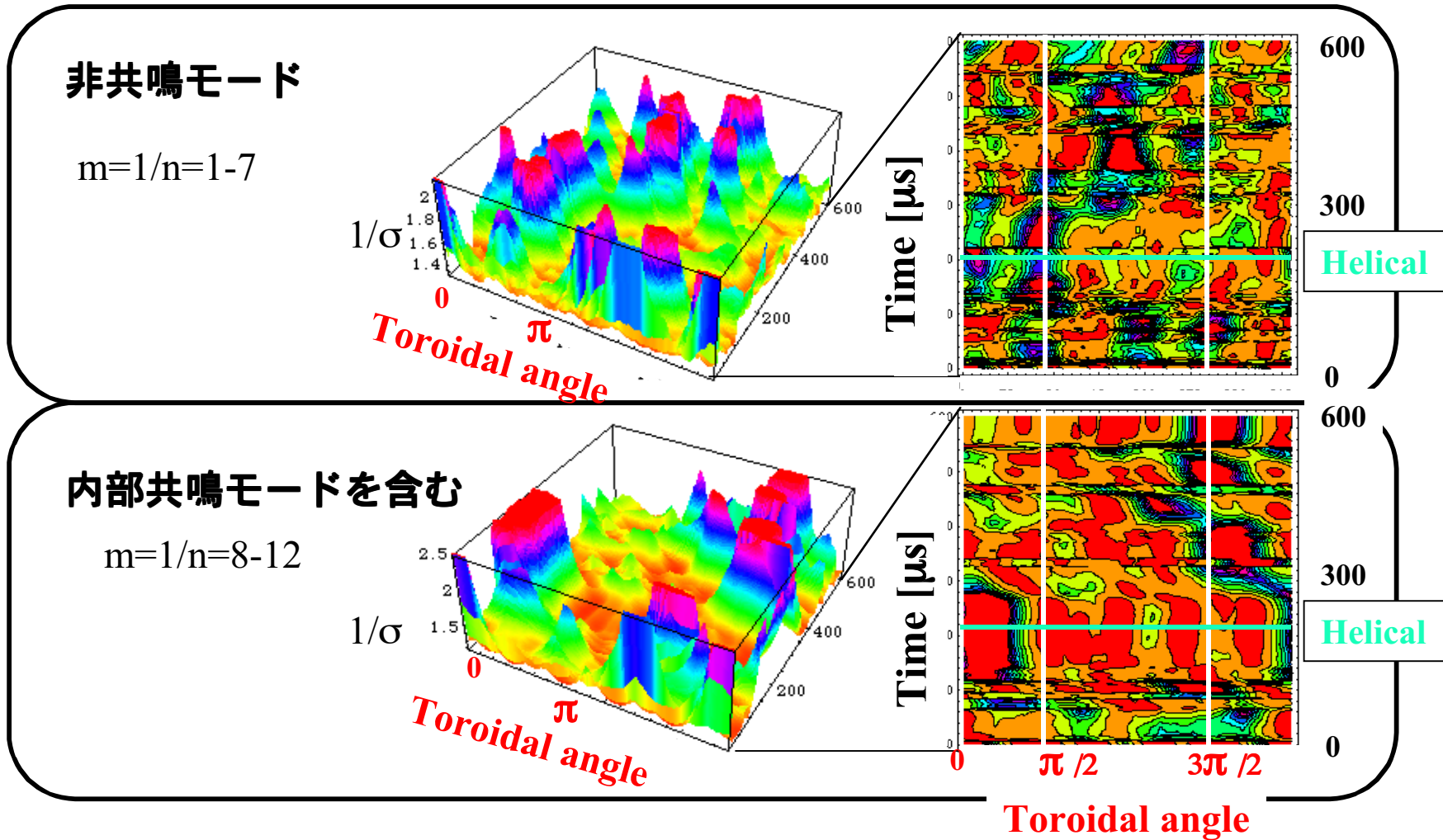
内部共鳴モードを含む

$m=1/n=8-12$

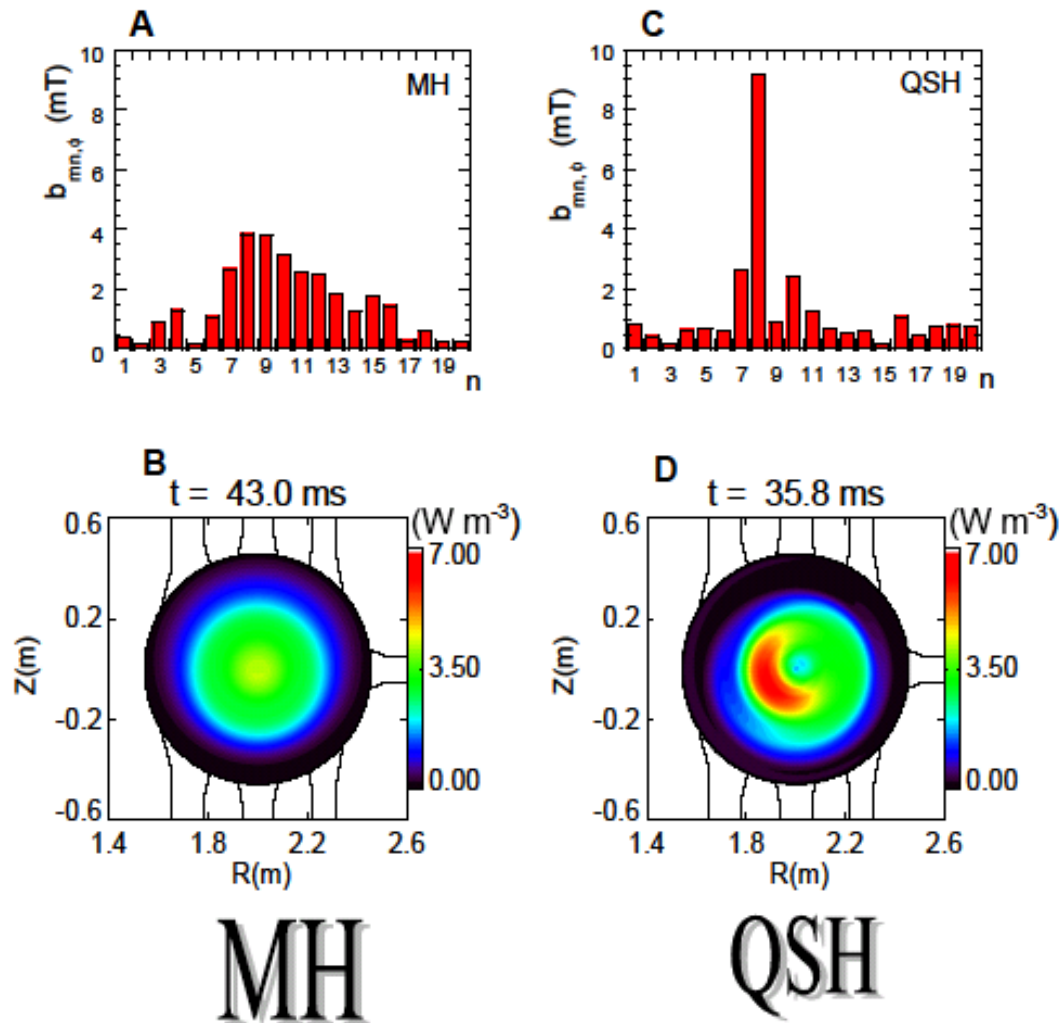


# 回転磁場のPhase Alignmentへの影響

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{1}{1 + 2 + \dots + (n_{\max} - n_{\min})} \times \sum_{j=n_{\min}}^{n_{\max}-1} \sum_{k=j+1}^{n_{\max}} \left| \sin \left( \frac{\Phi_{m,j}(\theta, \phi) - \Phi_{m,k}(\theta, \phi)}{2} \right) \right|$$



# 準シングルヘリシティ

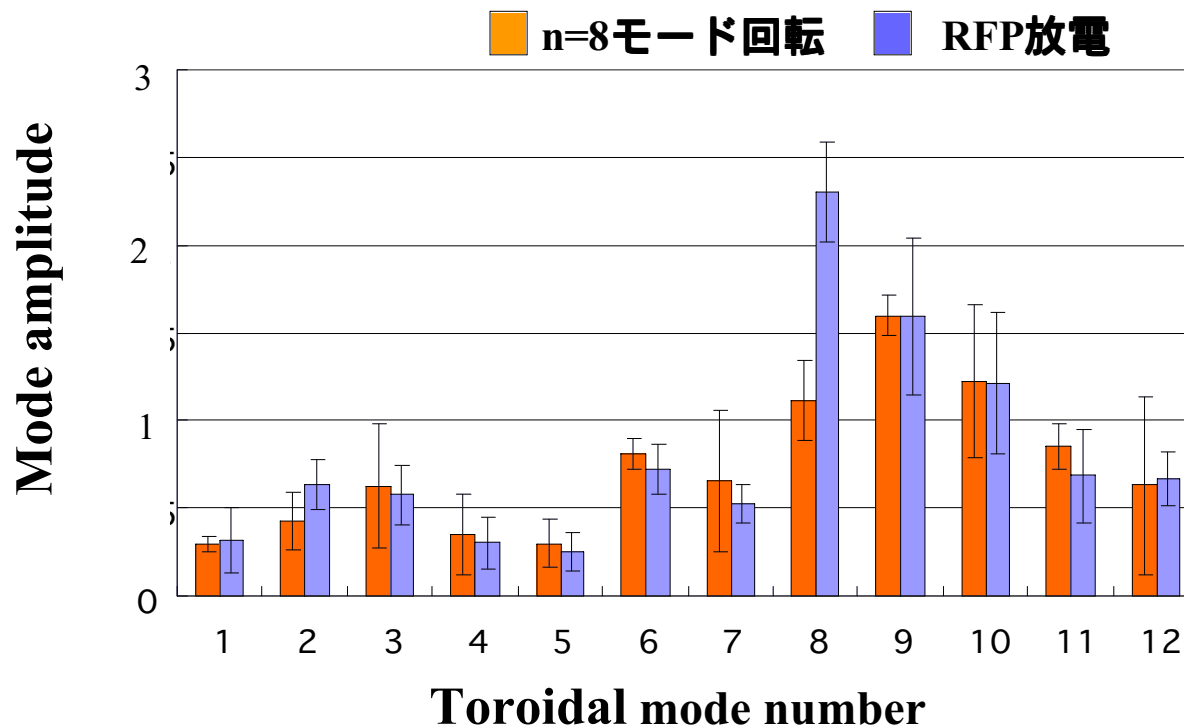


- 準シングルヘリシティ状態 (QSH)において、プラズマの中心温度上昇
- $m=1/n=8$ モード以外の擾動振幅が抑えられる
- プラズマの閉じ込め改善



# 回転磁場と準シングルヘリシティ

- ・ 回転磁場による $n=8$ 以外のモードの摂動振幅減少見られない  
→ 準シングルヘリシティ状態への移行見られず



# まとめ

外部からテアリングモードと共鳴する回転磁場を加えることによりモードにトルクを与え、回転を駆動する実験を行った。

- ・ 摂動磁場の共鳴モードが回転磁場と同方向に回転するショットが見られた。
- ・  $m=1/n=8$ モードはモードの回転により摂動振幅がRFPのときより減少する。
- ・  $m=1/n=8$ 回転磁場は内部非共鳴モードに影響を与えず、共鳴モードを含む位相に回転を駆動する。
- ・ 外部から共鳴する回転磁場を加えても準シングルヘリシティ状態には移行しなかった
- ・ 個々のショットには改善が見られたが、統計的にはっきりと改善したといえる段階ではない。
- ・ さらに実験を進めてモードを駆動させるパラメータを探るとともに、そのパラメータ領域において磁気プローブを挿入し、内部磁場の計測を行う。