

非線形スペクトル解析による RFPの周辺磁場揺動の研究

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

京都工芸繊維大学工芸科学研究科

2008年3月17-19日

第11回若手科学者によるプラズマ研究会
日本原子力開発機構 那珂核融合研究所

目次



「非線形スペクトル解析によるRFPの周辺磁場揺動の研究」

RFP磁場配位の特徴
RFPにおける最近の研究の進展



RFPの低アスペクト比化

低アスペクト比RFP実験装置RELAX

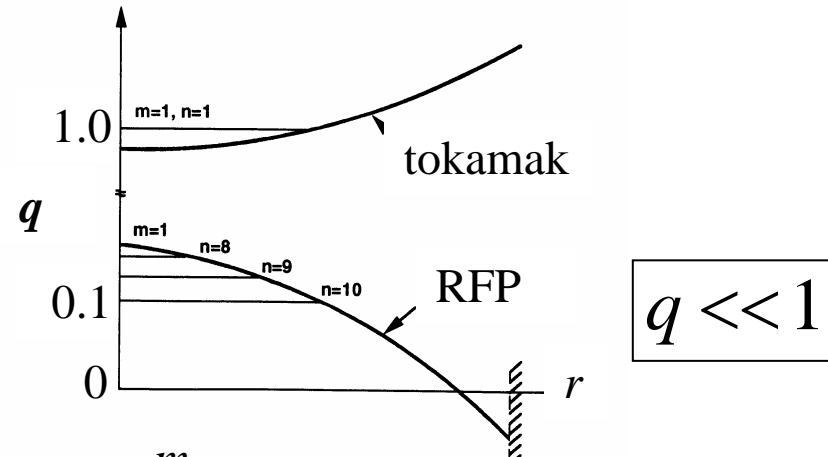
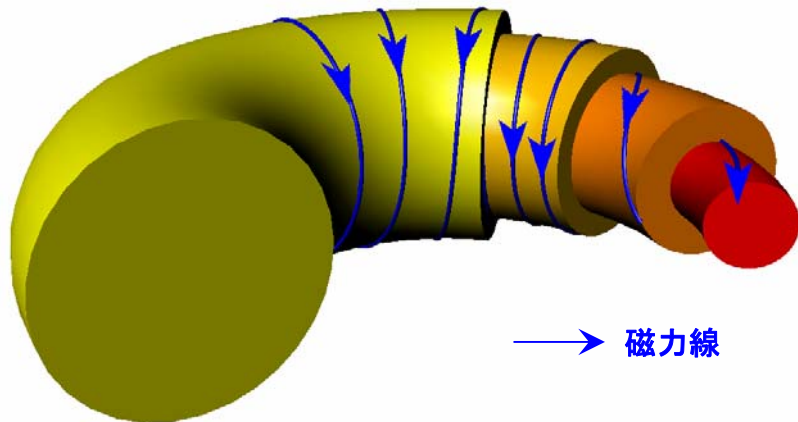
RELAX RFPプラズマの振る舞い

典型的な放電波形, 周辺磁場揺動の振る舞い → ポスターにて
高速カメラにより観測されたヘリカル構造, ... → 2. 恩地
平衡磁場配位の研究 → 3. 大木

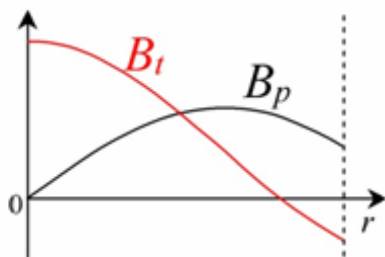


非線形スペクトル解析の適用

RFP (逆磁場ピンチ)



$$q(r_s) = -\frac{m}{n} : \text{モード有理面}$$



$$B_{\text{toroidal}} \approx B_{\text{poloidal}}$$

RFP磁場配位
(巨視的構造)

MHD不安定性

内部共鳴m=1モード(テアリングモード)が
プラズマ内部に多数密に存在する

$$\frac{m}{n} : q_0 (\ll 1) > \frac{1}{n} > \frac{1}{\infty}$$

m ≥ 2モードは存在しない

非線形MHD現象

非線形MHD現象を通じた巨視的構造の形成
⇒ 自己組織化する非線形システム

最近のRFP研究における進展



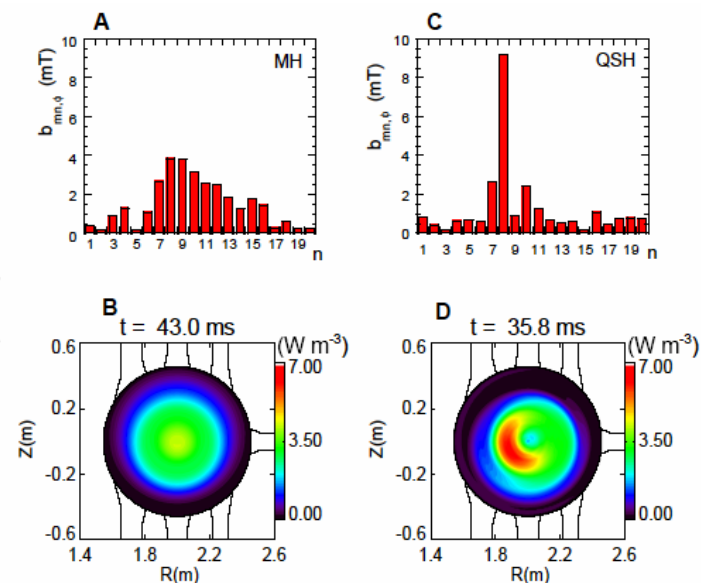
- ①パルスポロイダル電流駆動 (Pulsed Poloidal Current Drive, PPCD)
→ベータ値が~30%でトカマクと同程度の閉じ込めが実現

(H. Koguchi *et al.*, Plasma Fusion Res. 2, 050 (2007))

- ②(準)シングルヘリシティ ((Quasi-) Single Helicity, (Q)SH)
単一テアリングモードの成長による磁気島の回復と
磁気カオスの自己修復 (RFX, TPE-RX, MST)

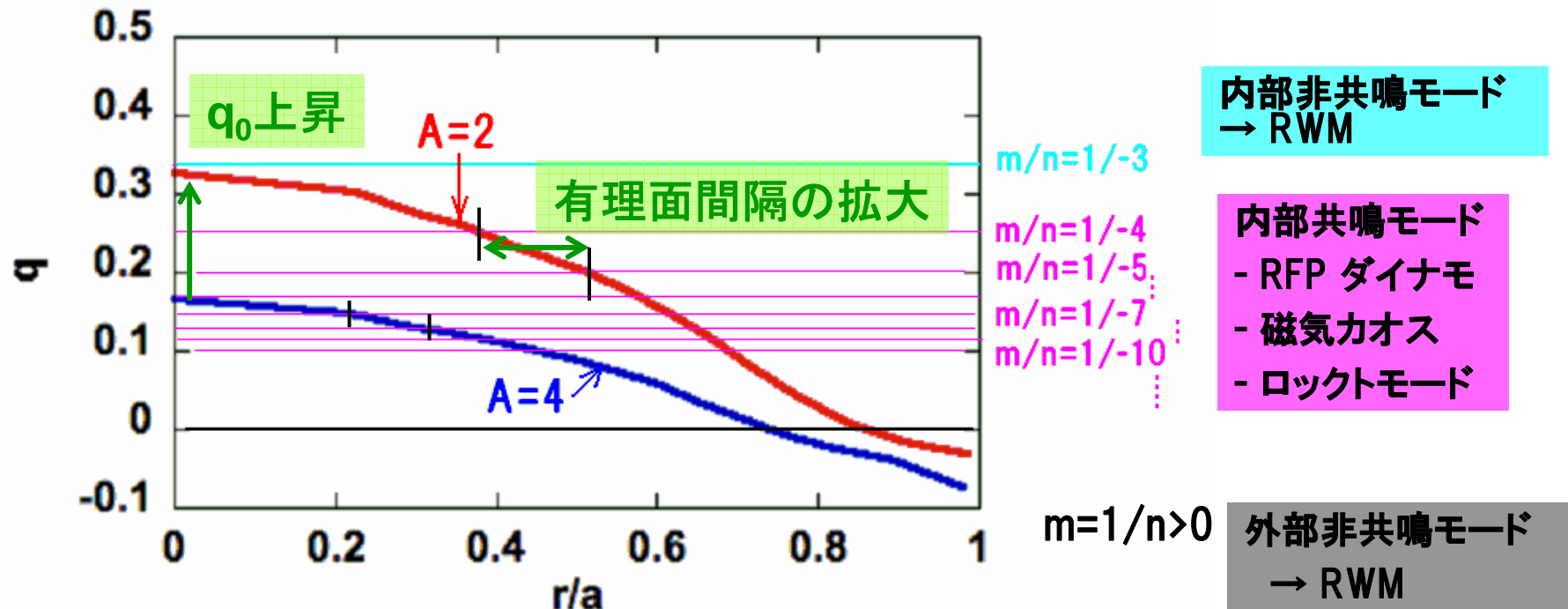


(Q)SH状態はトロイダル磁場が反転した
ヘリカル平衡のような状態！？



(D. F. Escande *et al.*, Phys. Rev. Lett 85, 1662 (2000))

RFPの低アスペクト比化



RFPにおける $m=1$ トロイダルモードスペクトルは、最も内側で共鳴するモードを主要モードとした幅広いスペクトルを示す

低アスペクト比化

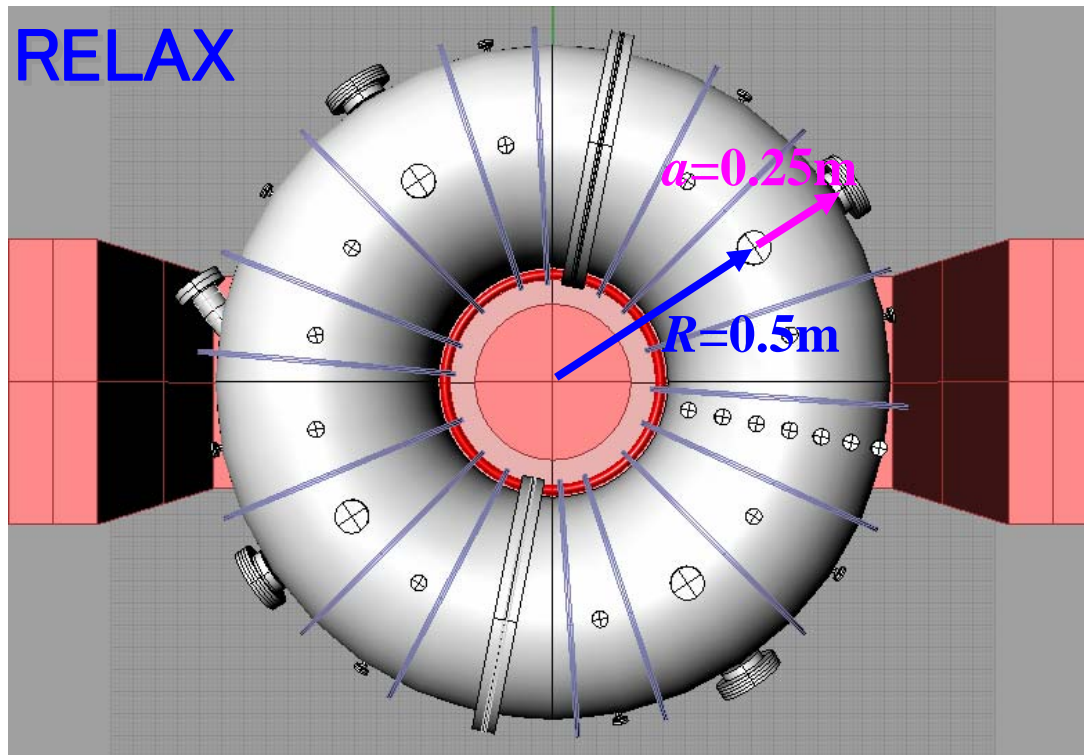
→ プラズマ中心領域のモード有理面間隔が広がる
⇒ 非線形MHD現象に及ぼす影響は？

予測 $\left[\begin{array}{l} \cdot \text{QSH状態へ遷移しやすい} \\ \cdot \text{モードダイナミクスがより単純に} \end{array} \right]$

低アスペクト比RFP実験装置RELAX

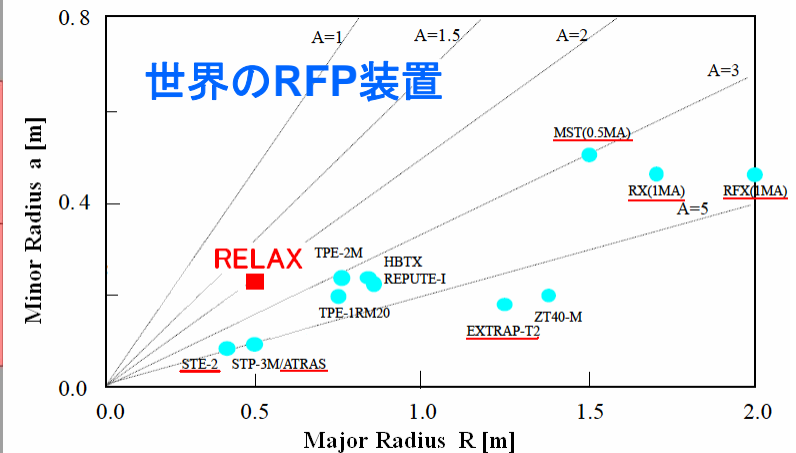


REversed field pinch of Low Aspect eXperiment



真空容器の特徴

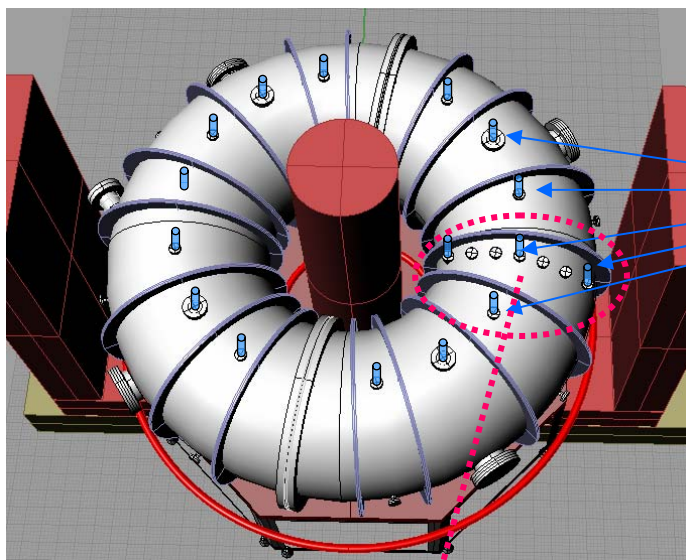
- 大半径 $R=0.5\text{m}$
- 小半径 $a=0.25\text{m}$
- アスペクト比 $A=(R/a)=2$



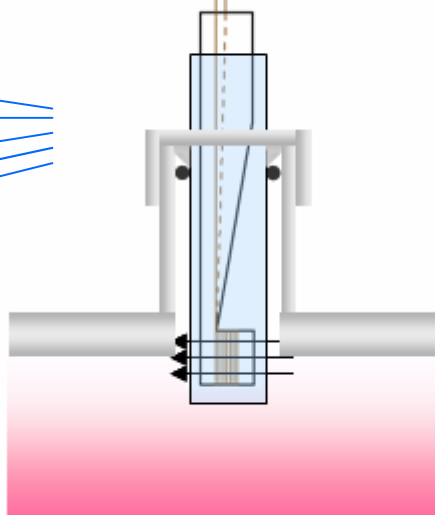
RFP装置としては世界最小のアスペクト比

- 材質: 4mm SS (抵抗性壁)
- 1ポロイダルギャブ

周辺磁場揺動計測システム



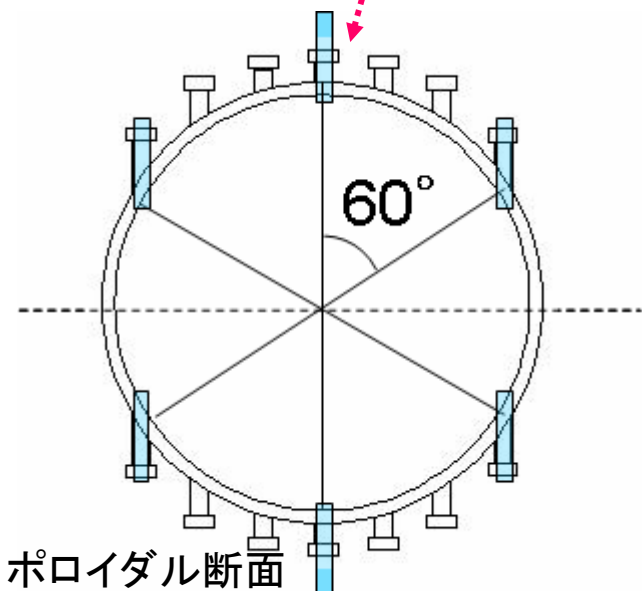
磁場ピックアップコイル



ポートから挿入し、
プラズマエッジ(内壁位置)
に設置

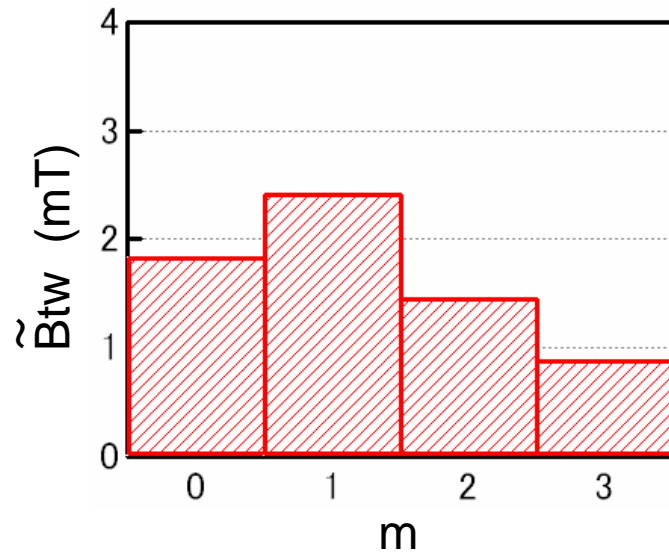
φ4mm

$r=a$ における B_t , B_p を計測



- トロイダルアレイ (22.5° 間隔) × 2 (上, 下)
⇒ $m=0, 1/n=0\sim 8$ モード
- ポロイダルアレイ (60° 間隔)
⇒ $m=0\sim 3$ モード

RELAX周辺磁場揺動のポロイダルモードスペクトル



● m=1モードが支配的

(RFPではm=1テアリングモードが支配的な不安定性)

● m=2モードが無視できない

(RFPでは通常 $|\tilde{B}_{tw}(m=1)| \ll |\tilde{B}_{tw}(m=2,3\dots)|$)



m=2モードの起源は？

2つの可能性

①

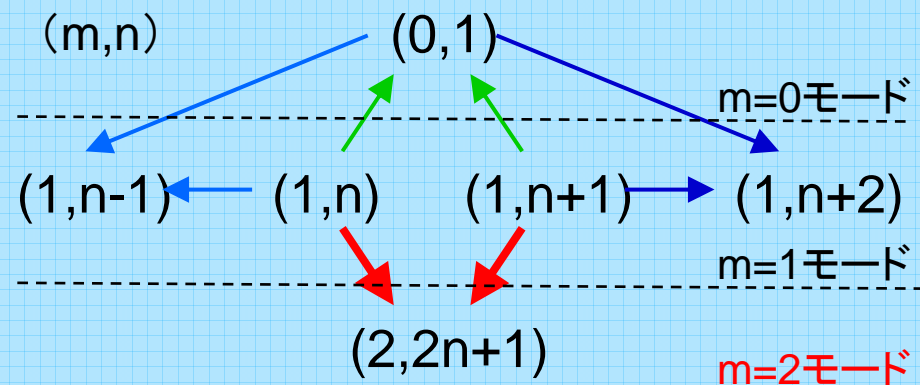
トロイダル結合

(アスペクト比が小
→トロイダル効果が大)

②

m=1モード間の非線形モード結合

(RFPではm=1モード有理面が多数密に存在)



バイスペクトル解析



非線形モード結合(三波結合, $k_1 + k_2 = k_3$)の度合いを,
バイコヒーレンス $b(k_1, k_2, k_3)$ によって定量的に評価する

バイコヒーレンス

$$b(k_1, k_2, k_3) = A \langle B(k_1)B(k_2)B(k_3) \rangle$$

$$A = \{ \langle |B(k_1)|^2 |B(k_2)|^2 \rangle \langle |B(k_3)|^2 \rangle \}^{-1/2}$$

$\langle \rangle$: アンサンブル平均

バイコヒーレンスとは

$$\frac{B(k_3)}{\langle |B(k_3)|^2 \rangle^{1/2}} = \underbrace{B_{unc}}_{\text{非結合項}} + \sum b(k'_1, k'_2, k_3) \underbrace{\frac{B(k'_1)B(k'_2)}{\langle |B(k'_1)|^2 |B(k'_2)|^2 \rangle^{1/2}}}_{\text{三波結合によって生じる } B(k_3) \text{ の成分}}$$

非結合項 ($\langle B_{unc} B(k_1) B(k_2) \rangle = 0$)

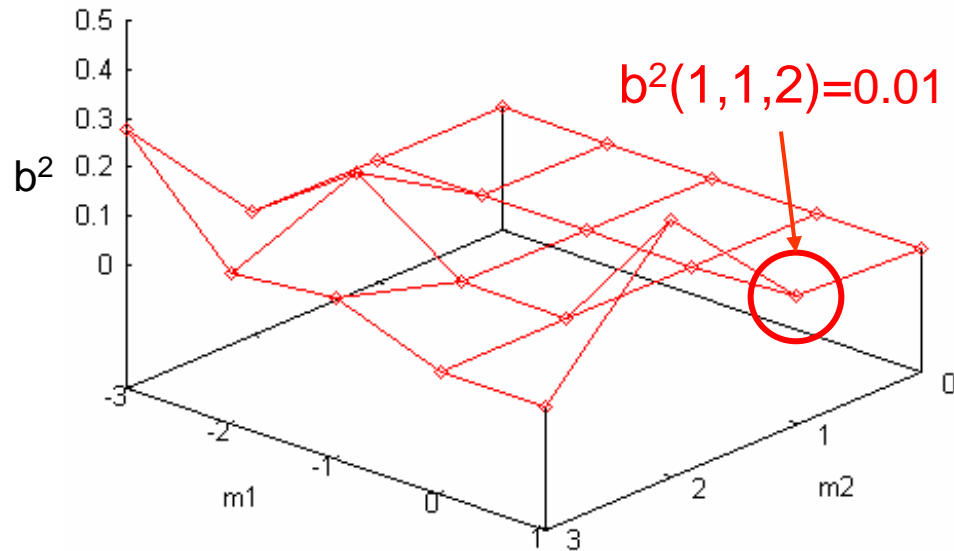
三波結合によって生じる $B(k_3)$ の成分

バイコヒーレンスが非線形結合係数として入る

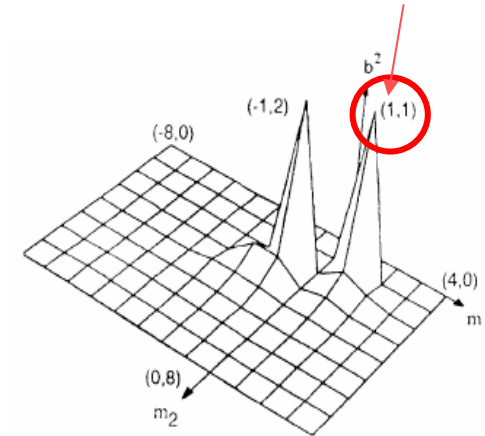
バイコヒーレンス



RELAX(A=2)



MST(A=3) $b^2(1,1,2)=0.35$



(S. Assadi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **69**, 281 (1992))

A=2のRELAXではm=1モード間の非線形モード結合により、m=2モードが生成される効果 $b^2(1,1,2)$ が非常に小さいことが判明

→低アスペクト比化により、主要な(プラズマ中心近くの)内部共鳴モードの有理面間隔が広がり、磁気島の重なりが軽減された。

→m=2モードはトロイダル効果によって生成されている可能性が高い。

まとめ



RELAXにおいて観測される大きな振幅をもつ $m=2$ モードの起源に注目してバイスペクトル解析を行った.

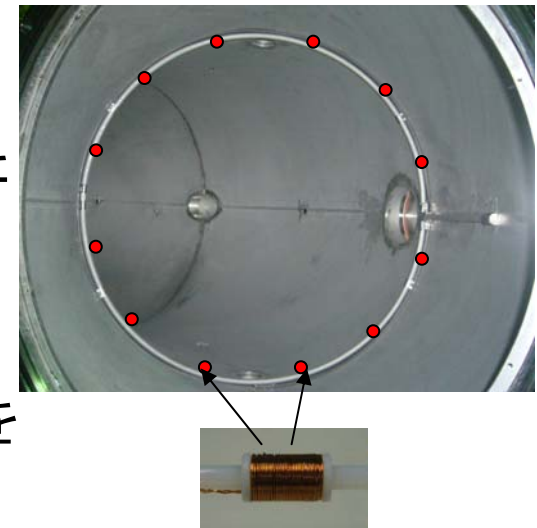
RELAXにおける $m=1$ モード間の非線形結合効果は他の装置よりも弱いことが判明した.

この理由の1つは比較的離れたモード有理面にあると思われる.

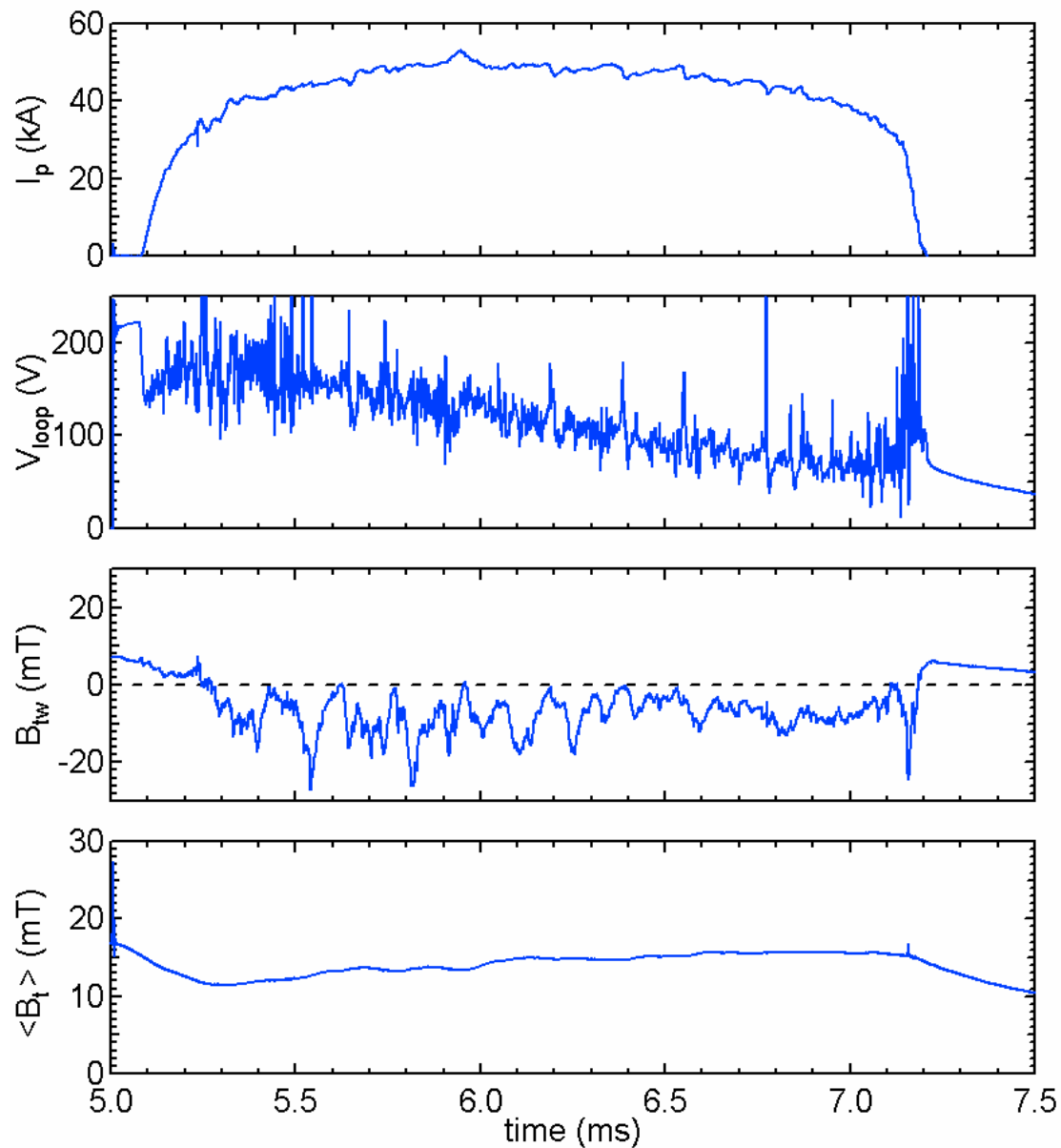
今後

モード分解能を既存の $m=0-3$ から $m=0-6$ まであげたポロイダルアレイを新規に制作し, 真空容器内に設置した.

これを用いて, より高分解能のバイスペクトル解析を行うと共に, 他の装置との比較研究を行う予定.



RELAX RFPプラズマ



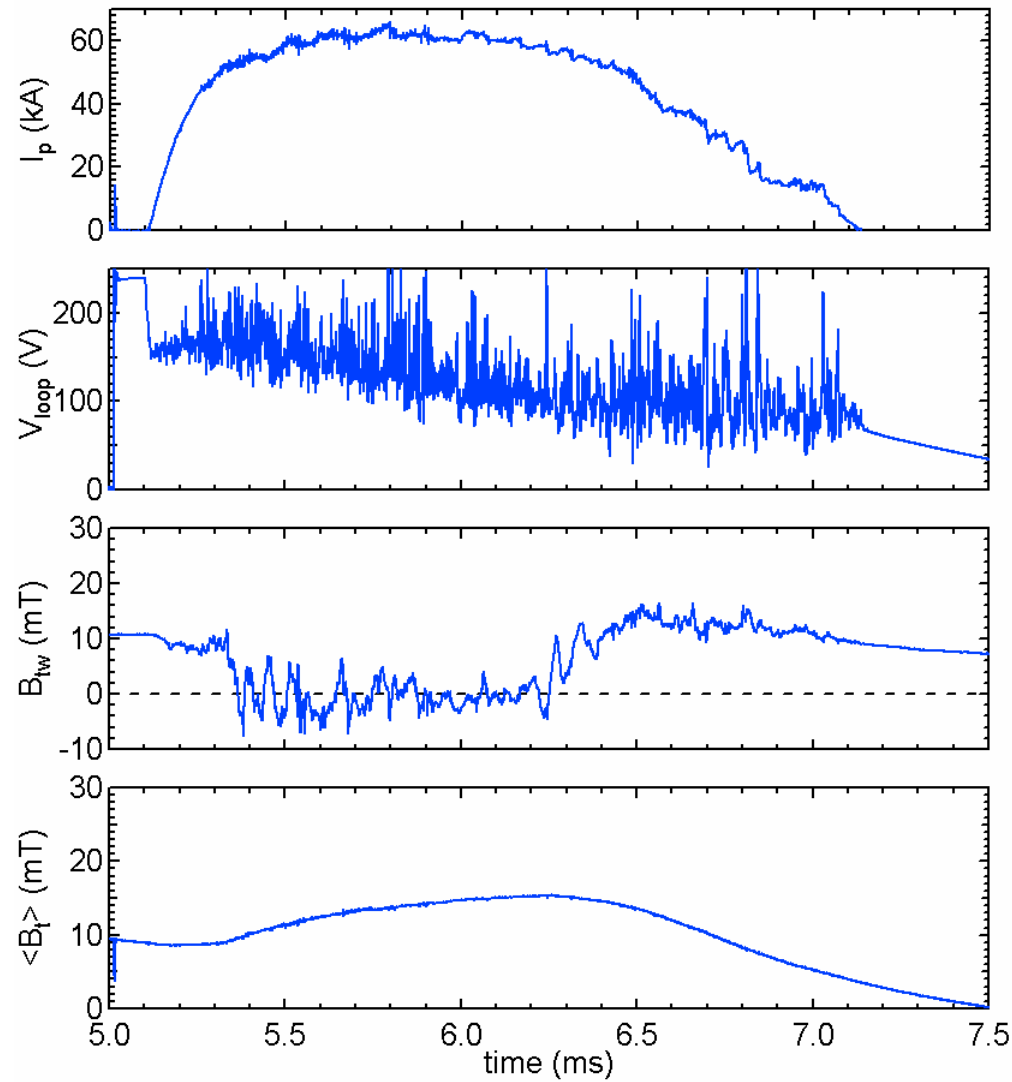
放電領域

プラズマ電流 I_p : 40~80kA

放電時間: ~2ms

電子温度 T_e : ~50eV

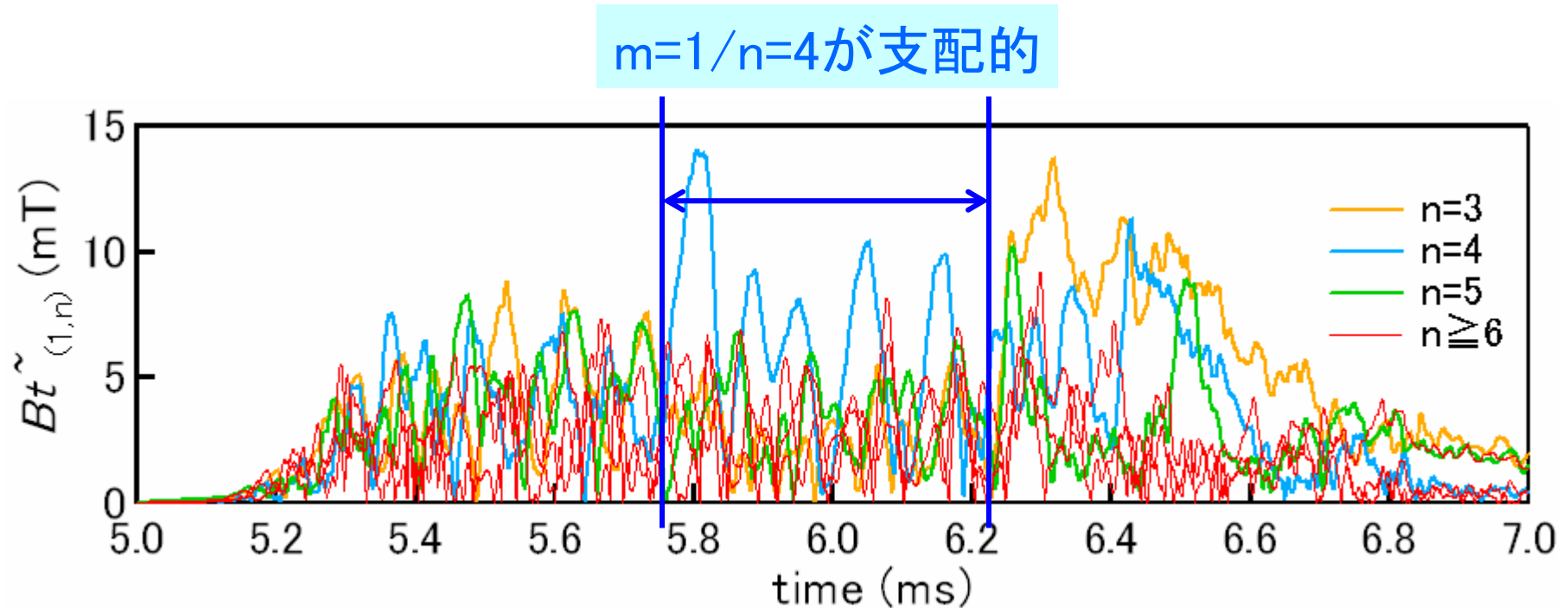
RELAX RFPプラズマ (浅い反転)



RELAX RFPの周辺磁場揺動の振る舞い 特徴的な例

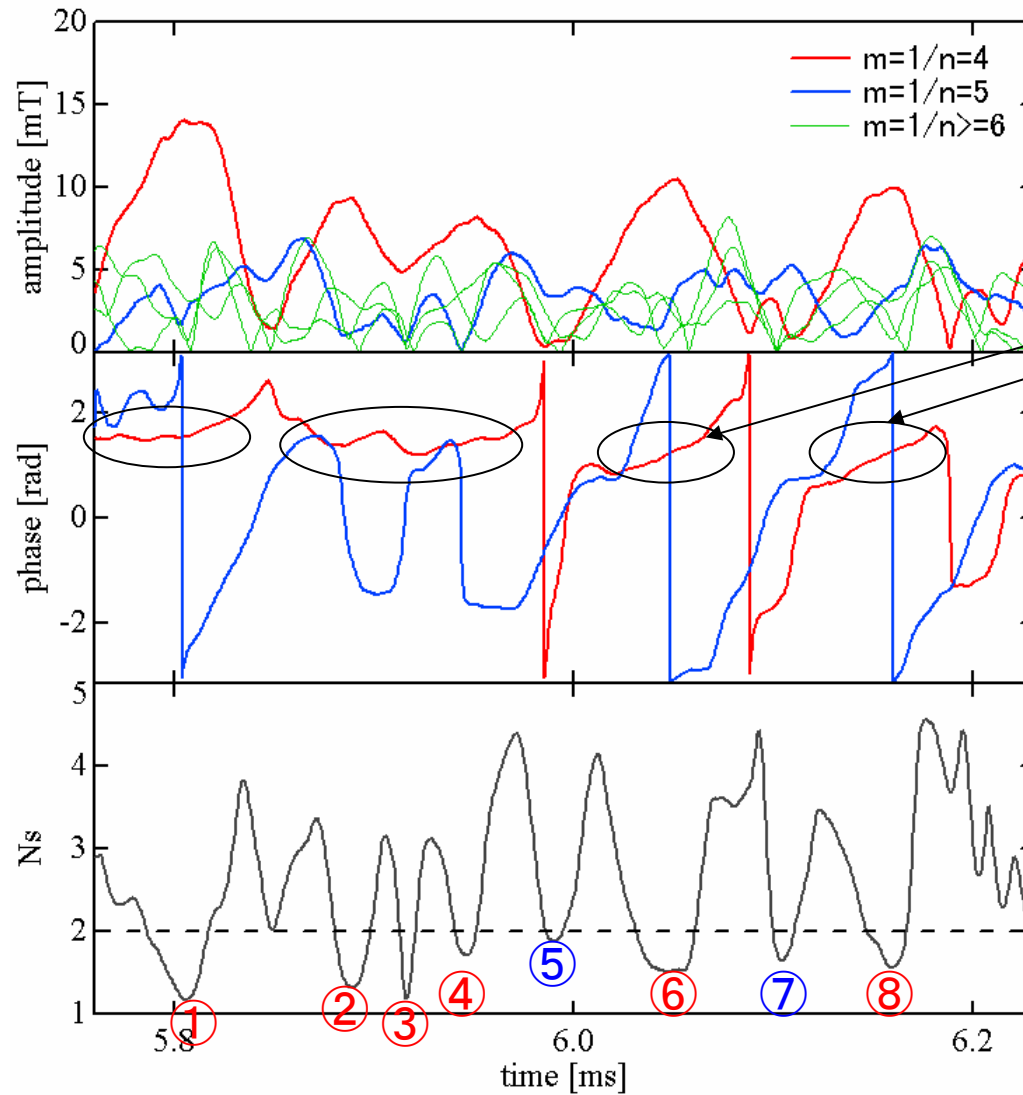


m=1モード振幅の時間発展



m=1/n=4が主要モードのとき、
成長・減衰を繰り返すが、QSHに似た状態へ
頻繁に遷移する傾向がある。

振幅と位相の関係



モードの回転が止まる
(減速される)とモード
が成長する(振幅が
増大する).

N_s : Spectral Index

$$N_s = \left[\sum_{n=-11}^{-31} \left(\frac{b_{1,n}^2}{\sum_n b_{1,n}^2} \right)^2 \right]^{-1}$$

磁場エネルギーのトロイダルモードへの広がりを意味する

$N_s = 1$: SH

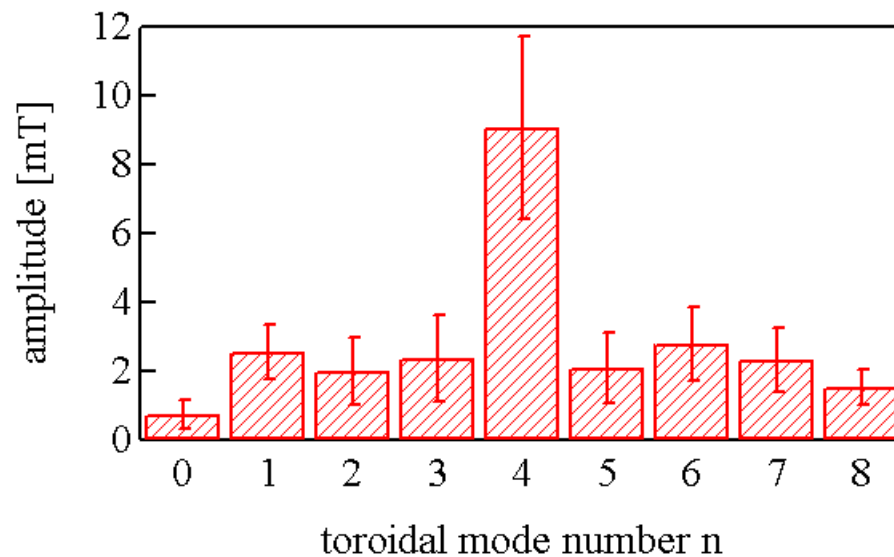
$N_s \leq 2$: QSH

$N_s > 2$: MH

$N_s < 2$ の時間幅で平均した $m=1$ トロイダルモードスペクトル



①-④, ⑥, ⑧の時間幅で平均した
 $m=1$ トロイダルモードスペクトル



⑤, ⑦の時間幅で平均した
 $m=1$ トロイダルモードスペクトル

