

TST-2球状トカマクにおける MHD不安定性とq分布の関係

The relation between MHD instability and safety factor profile in TST-2 spherical tokamak

2006.3.16

高瀬・江尻研究室 佐々木 真

背景

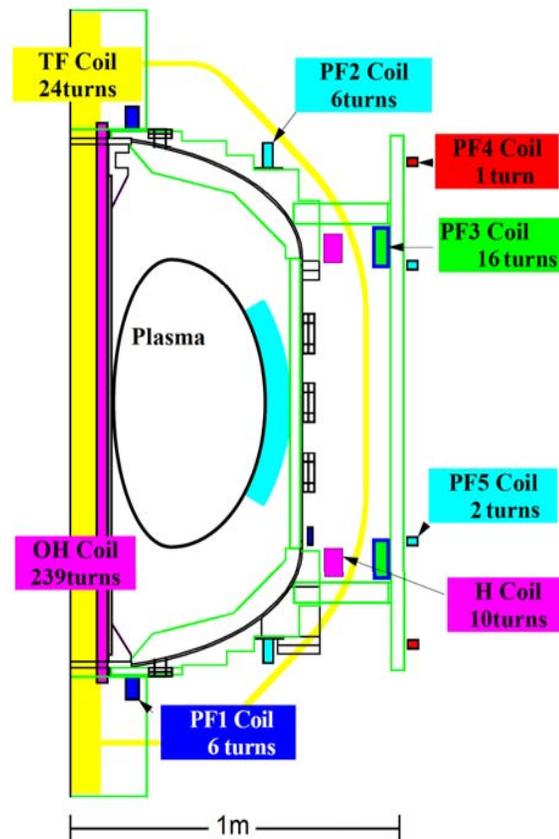
核融合の実現 高温、高密度、長時間の閉じこめが必要

球状トカマク

- high β
- 経済性にも優れている

不安定性(プラズマの性能低下)の解明

- TST-2ではInternal Reconnection Event (IRE)と見られる現象が観測されている。
- 発生機構は不明。



不安定性



プラズマの形状,分布

揺動の成長

平衡解析

目的

1. 平衡解析の信頼性の向上

(1) 渦電流の正しい評価

(モードの数を決める)

(2) 圧力などの磁気面関数の表現

(べき乗か多項式か?)

2. 不安定性の解析(磁気揺動に注目)

(1) 不安定性の分類

(トロイダルモード数に注目)

(2) 分類された不安定性の起こる条件

平衡解析における渦電流のモード分解

渦電流の効果は無視できない

1. 磁場の変化→渦電流を誘起 (<5ms)
2. TST-2では放電時間が短い(~30ms)
3. 渦電流のプラズマへの影響が大きい

(平衡磁場の一割程度)

渦電流を推測しなければならない

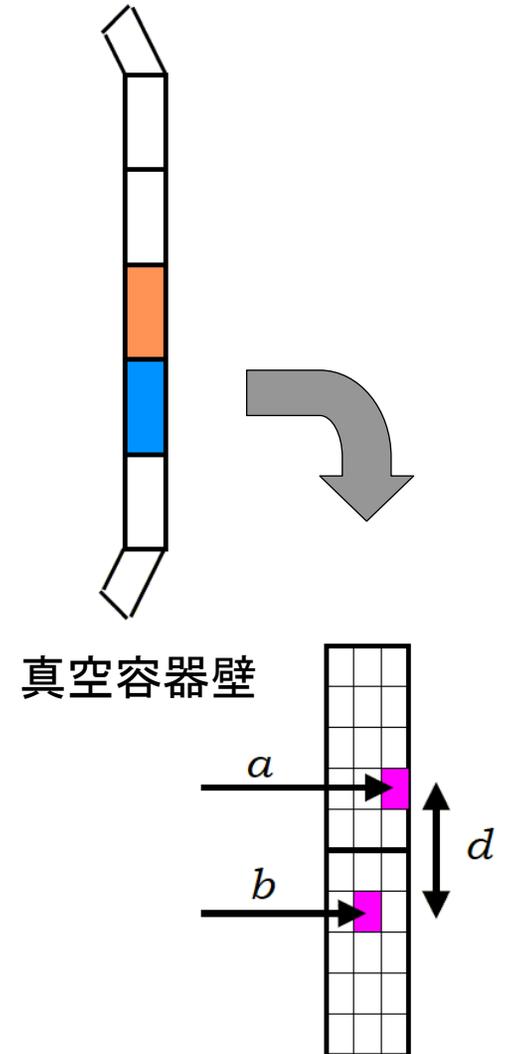
$$\vec{L}\dot{\vec{I}} + \vec{M}\dot{\vec{J}} + R\vec{I} = 0$$

$$\vec{I} = \vec{I}_{eigen} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{eigen}}\right)$$

各モードの振幅をfree parameterとして

平衡計算に導入

S. Shiraiwa, *et al.*, Bull. Am. Phys. Soc. **46**, 307 (2001).

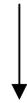


平衡解析の改良点

1. 渦電流モードの数

モード数は無限に分解される

多くのモードを入れすぎると数値的に不安定になる



渦電流を直接測定, 有意なモード数を決定

2. 圧力, toroidal flux functionの表式

$$p'(\psi) = f(\psi, \alpha_1, \alpha_2, \dots)$$



$$p'(\psi) = p_0 (1 - \tilde{\psi})^{\gamma_p - 1} \quad (\text{model 1})$$

$$p'(\psi) = \sum_{i=1}^{N_p} p_i (\tilde{\psi}^{i-1} - \tilde{\psi}^{N_p}) \quad (\text{model 2})$$

より現実を表現できるmodelをDiamagnetic fluxの測定で決める



平衡解析で計算するW
と測定したWを比較

渦電流測定

渦電流の評価

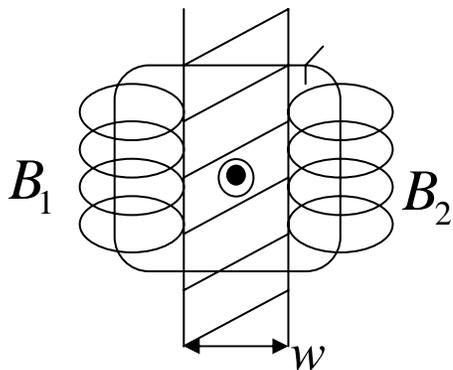
装置壁のインダクタンス
を無視できないのか？

$$I_{eddy} = \frac{V}{R_{wall}} \quad (1)$$

測定原理

真空容器外にもpick-up coilを設置

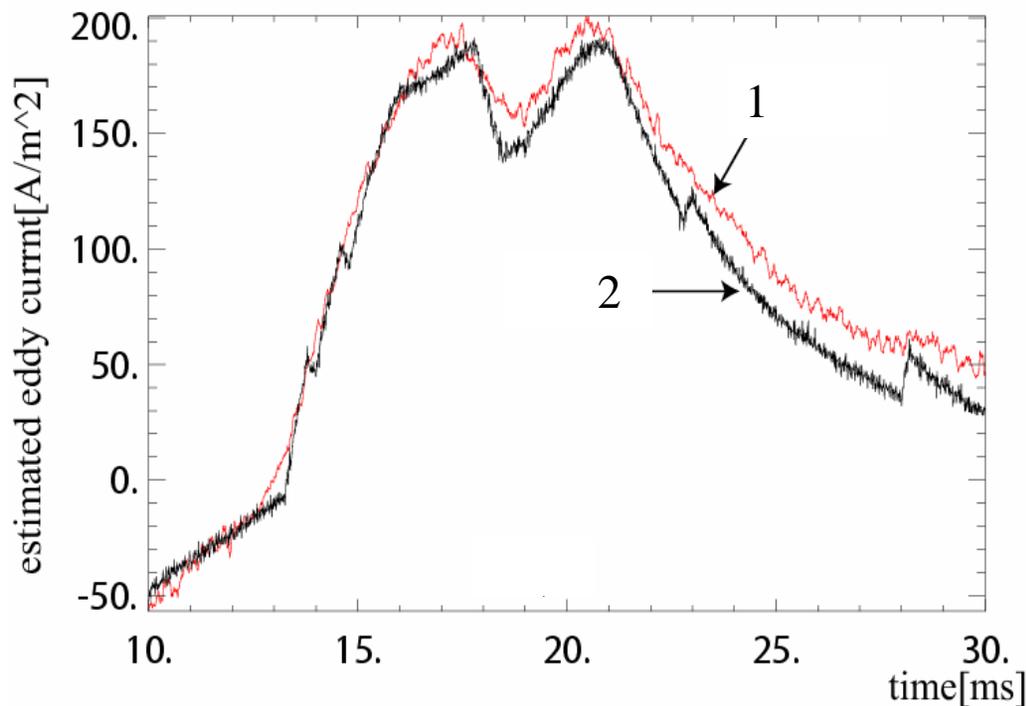
$$I_{eddy} = \mu_0 (B_1 - B_2) / w \quad (2)$$



V : fluxloopで分かる

$R_{wall} : 7.0 \times 10^{-7} \Omega / \text{cm}$ (ステンレス)

SN40150



渦電流モードの数

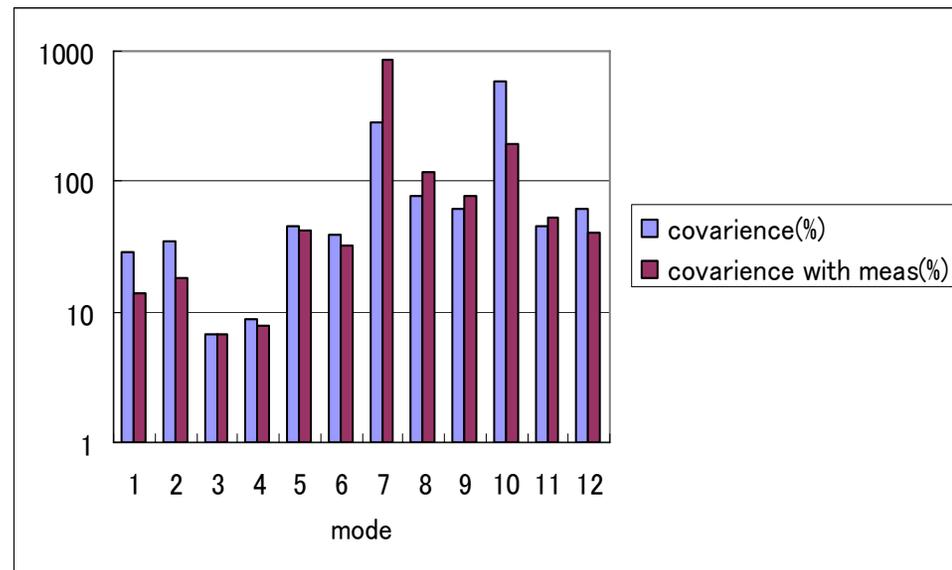
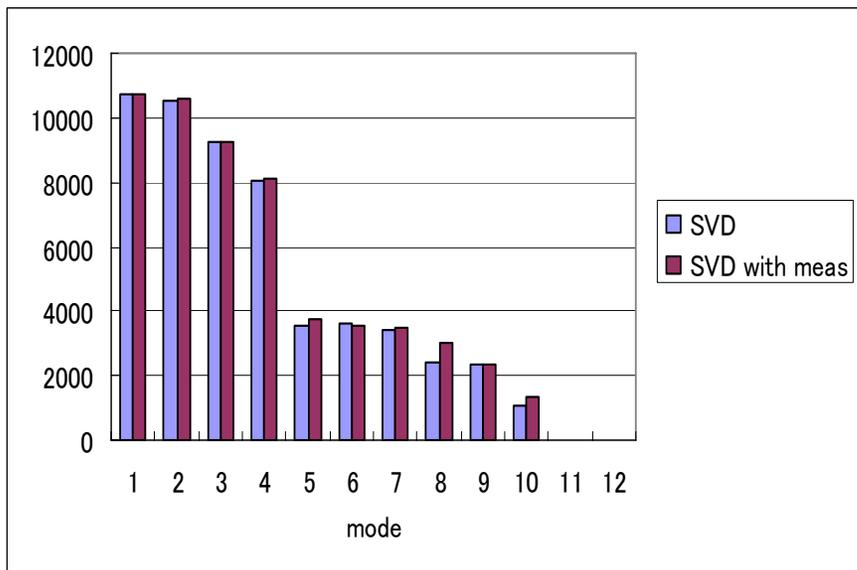
各モードの特異値,共分散に注目

特異値:fittingに効いているか(大きい)

共分散:fittingの信頼性(小さい)

壁外の磁場測定を平衡計算に導入する前と後での値の変化

有意なモード→特異値大きく,共分散小さくなる

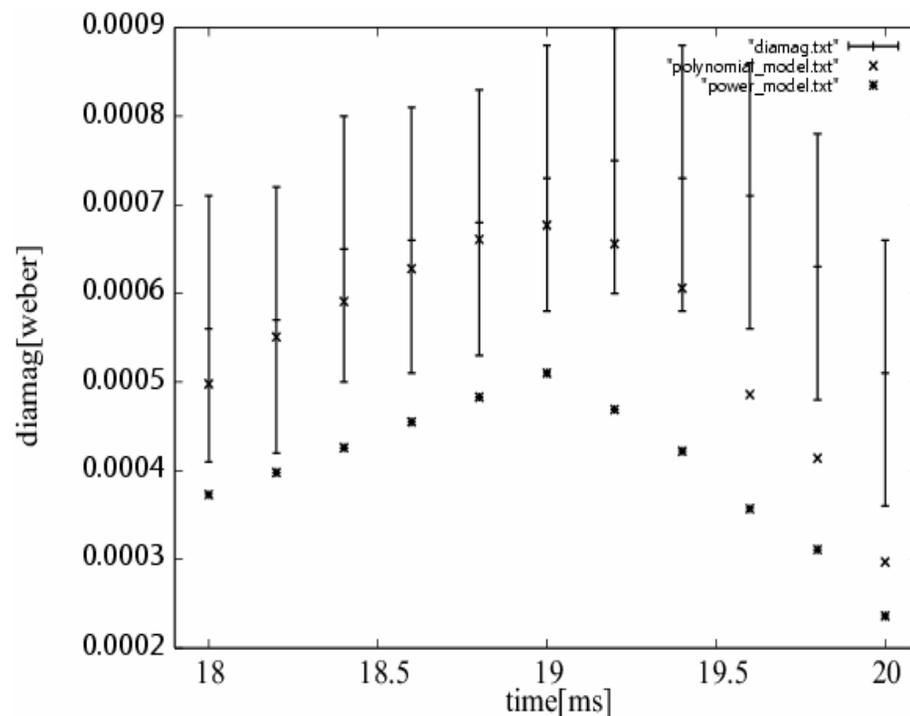
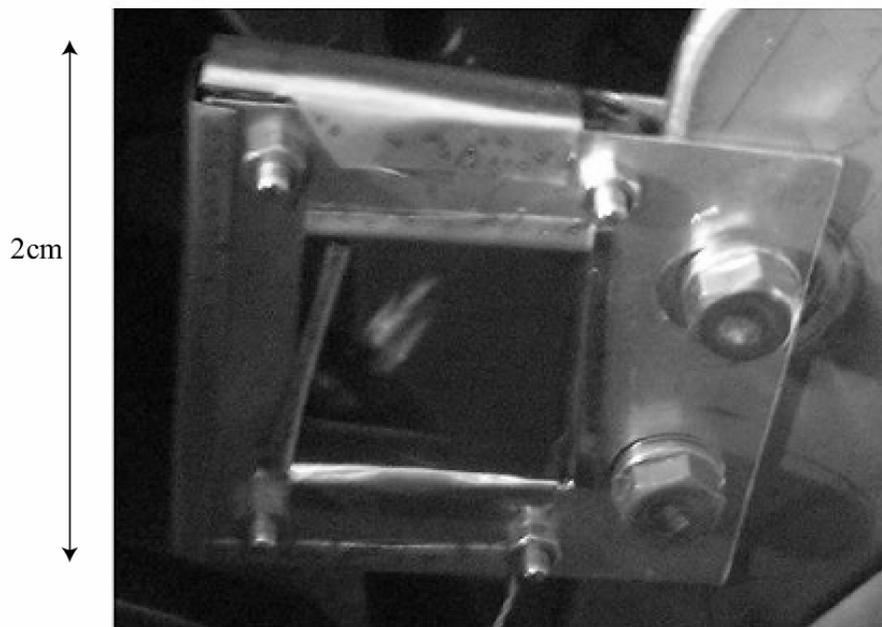


有意なモードは1-6

Diamagnetic fluxの測定

$$\Delta \psi_{toroidal} = \int dRdzB_{\phi} - \int dRdzB_0 \rightarrow W$$

$\int dRdzB_0$ の測定



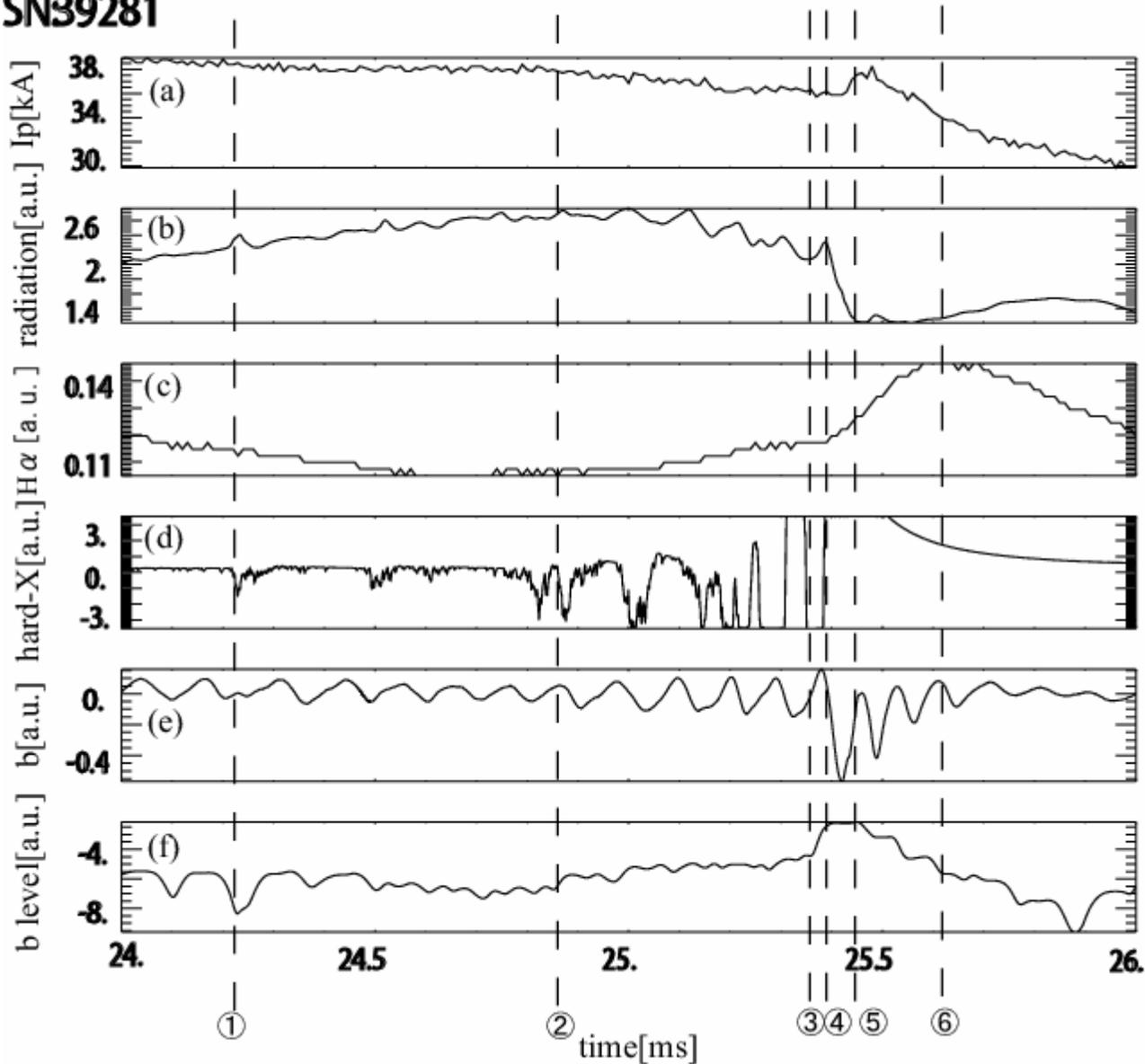
多項式モデルがよい
(図では $N_p=1, N_g=2$)

精度の高い測定が必要

$$\frac{\Delta \psi_{toroidal}}{\int dRdzB_0} \sim 0.1\%$$

典型的なMHD event

SN39281



他にも I_p にスパイクの現れないものなど様々な種類が観測されている。

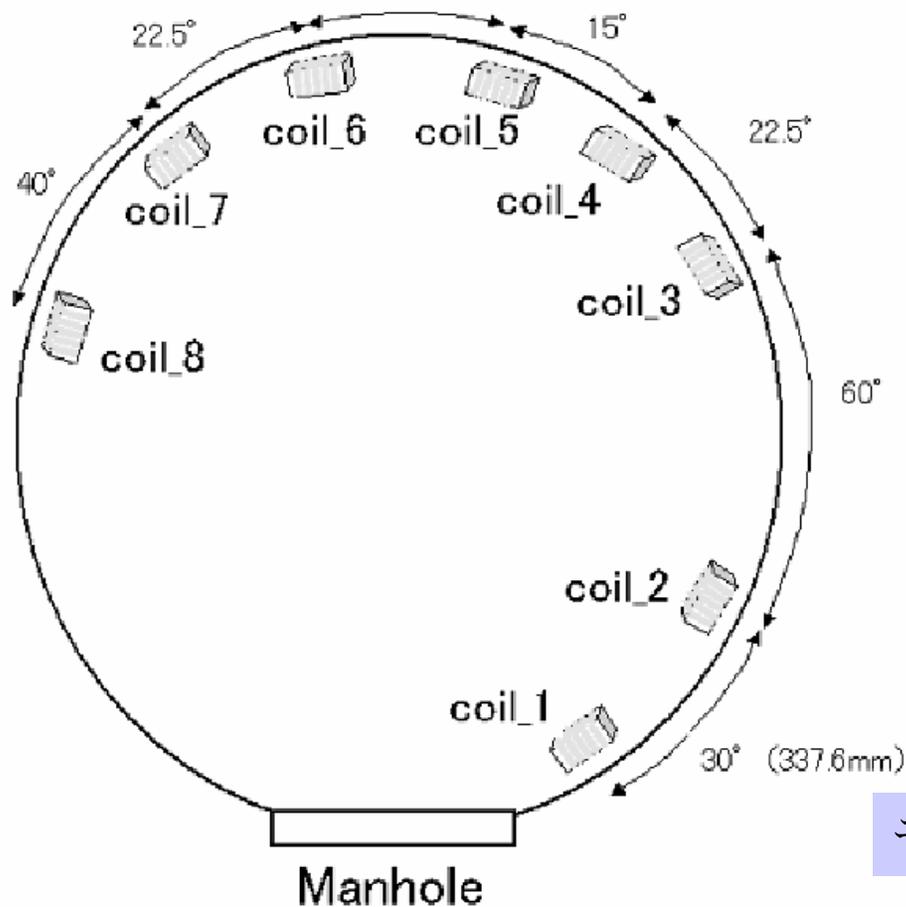
$$b\text{-level} \equiv \log(\langle b^2 \rangle_t)$$

磁気揺動の解析

プラズマの不安定性

揺動のモード数 $\sim \exp(in\phi)$

n-coilを用いる



周波数に関してFourier解析をし
各コイルの位相を求める。



横軸:トロイダル角度 ϕ

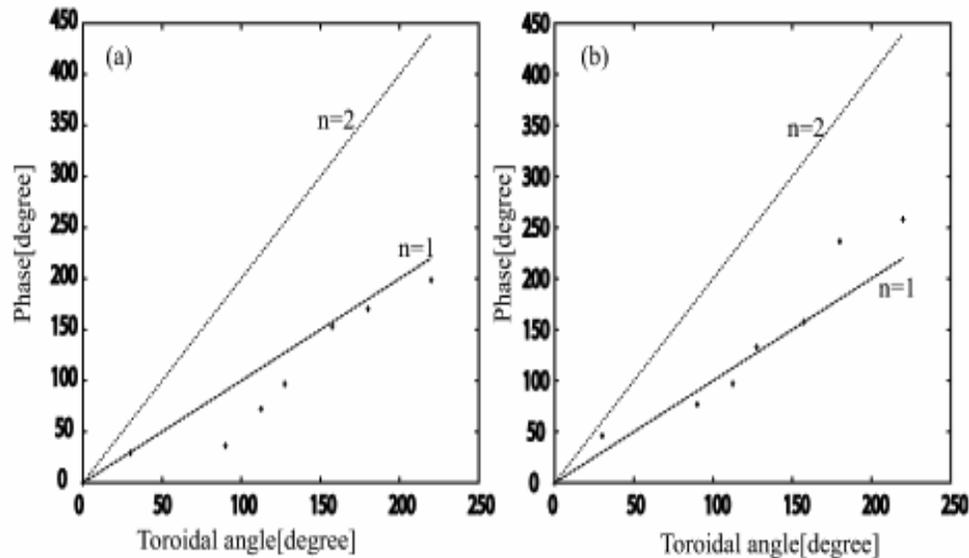
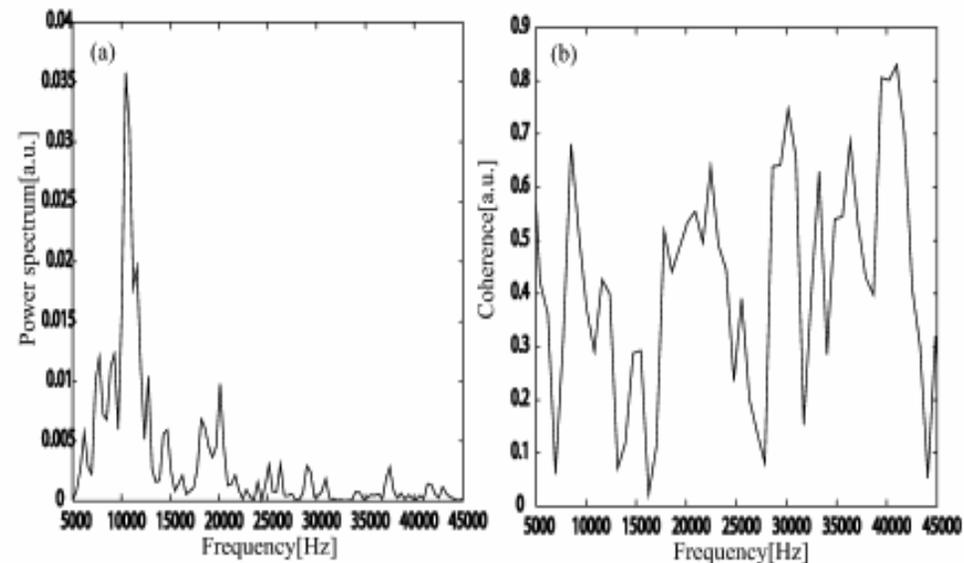
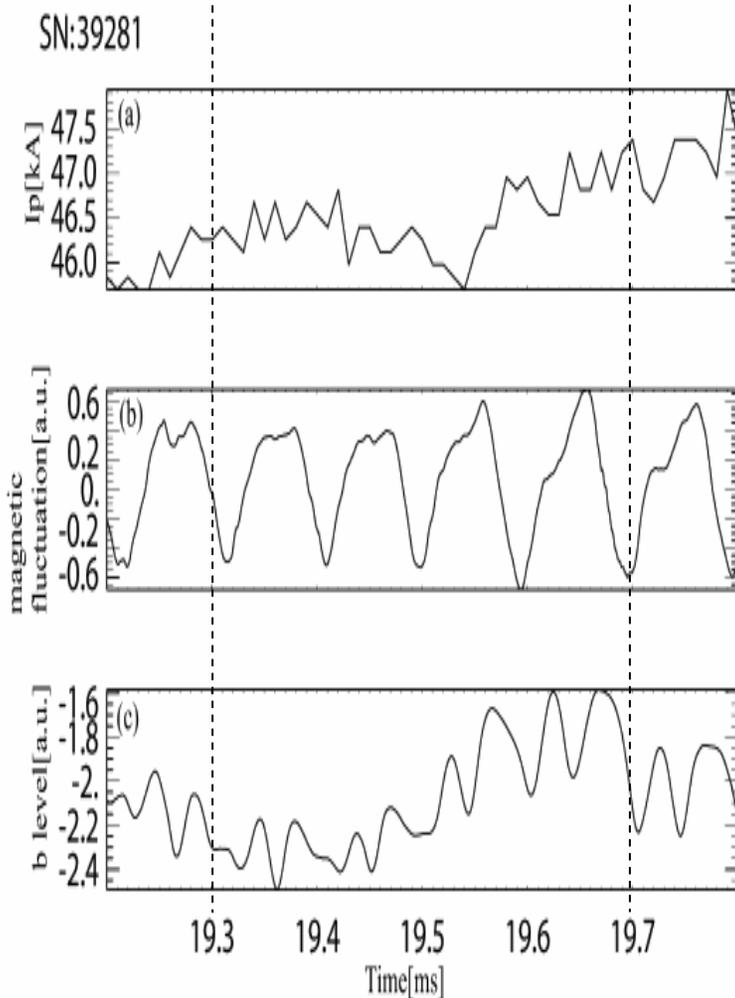
縦軸:位相

傾き= n

モード数の振る舞いで2個のtypeに分類

type-1 (1)

モード数がeventの前後で変化しない



8kHz

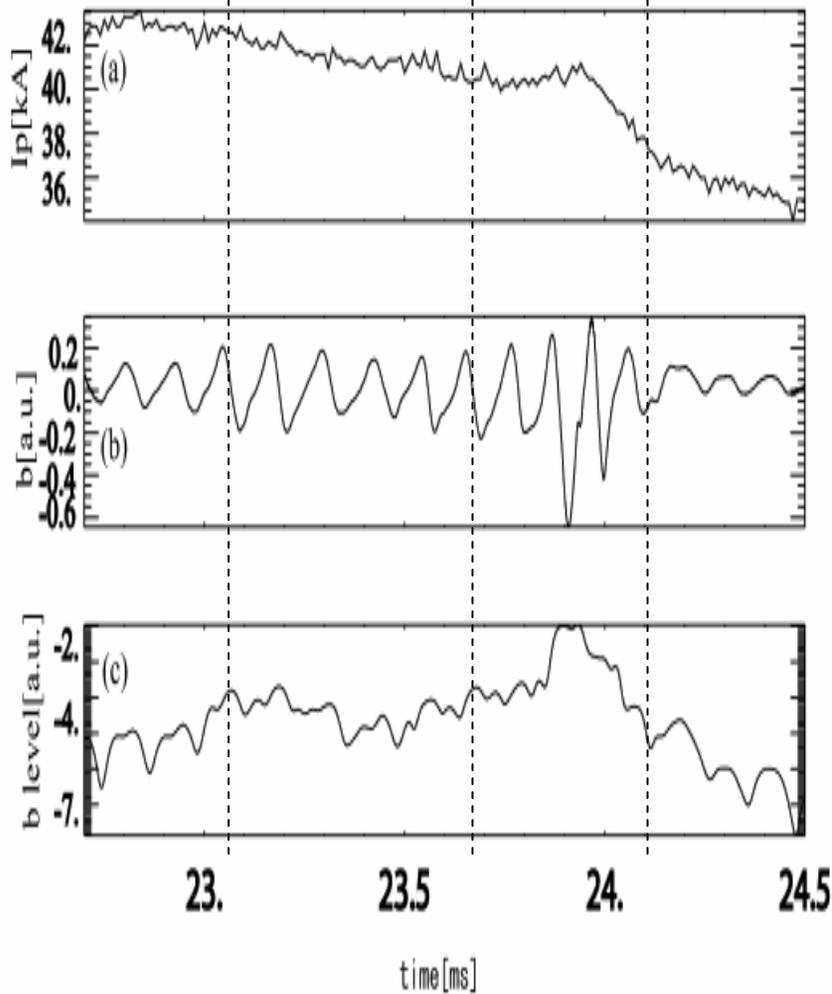
20kHz

モード数がeventの前後で変化しない

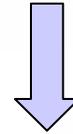
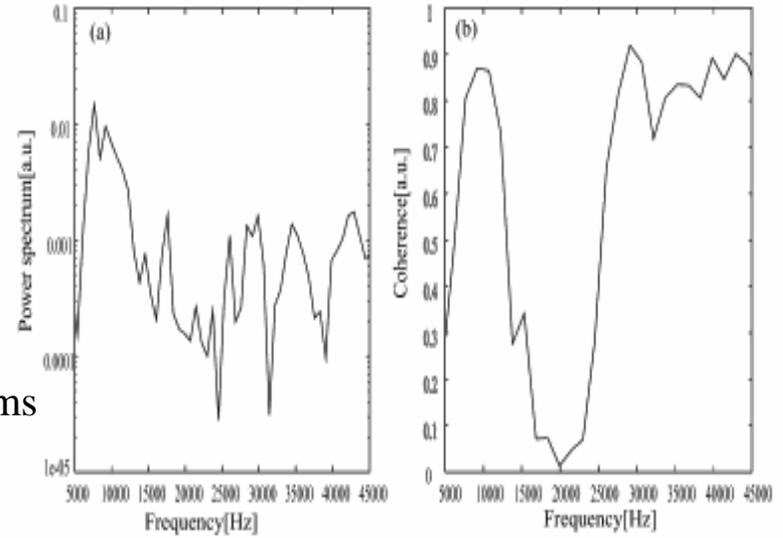
type-2 (1)

eventの直前直後でモード数が増える

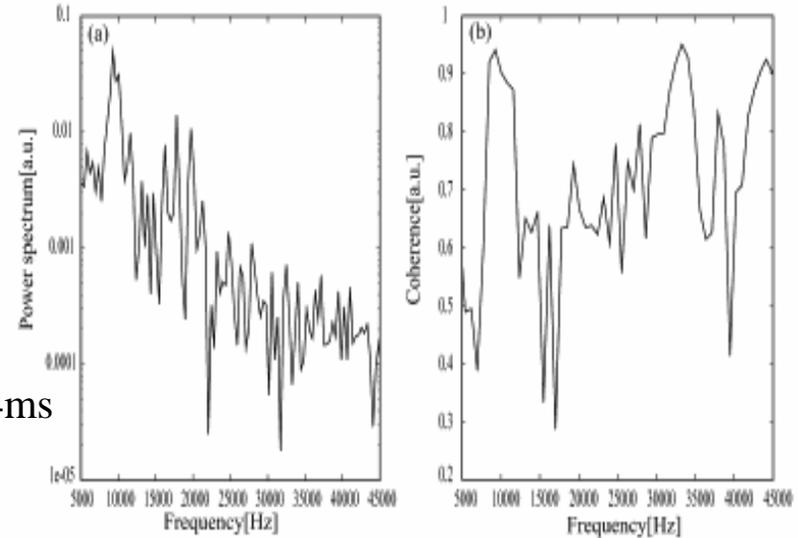
SN39280



$t=22.7-23.2$ ms

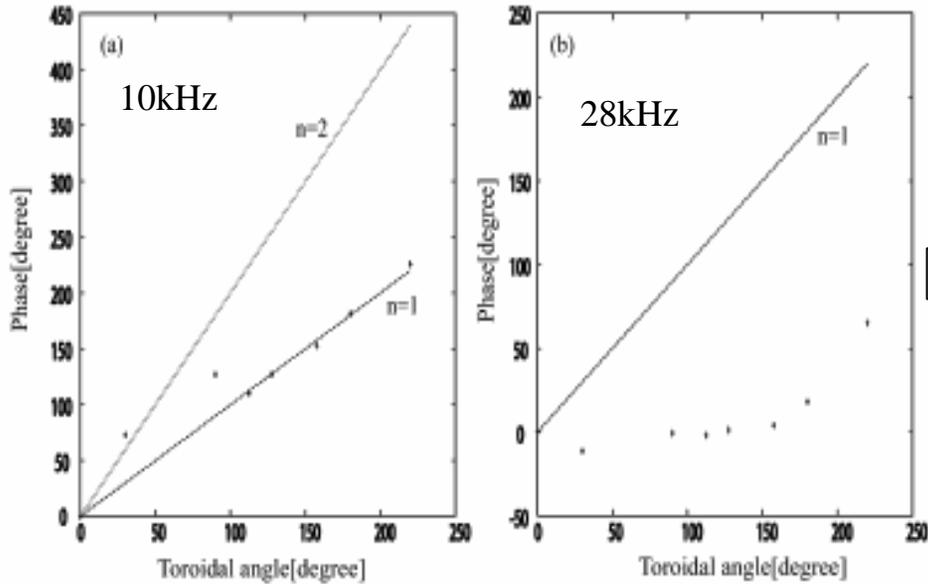


$t=23.3-24$ ms

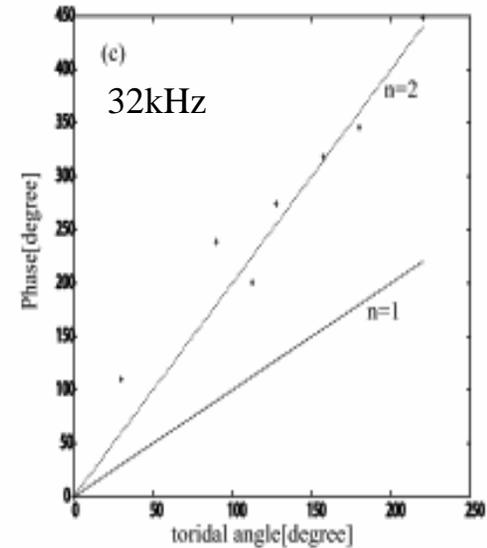
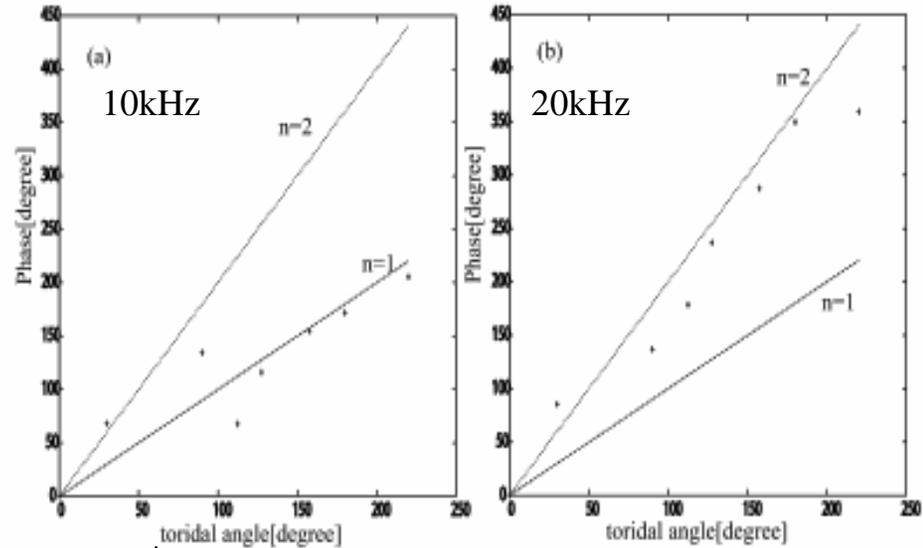


type-2 (2)

$t=22.7-23.2\text{ms}$

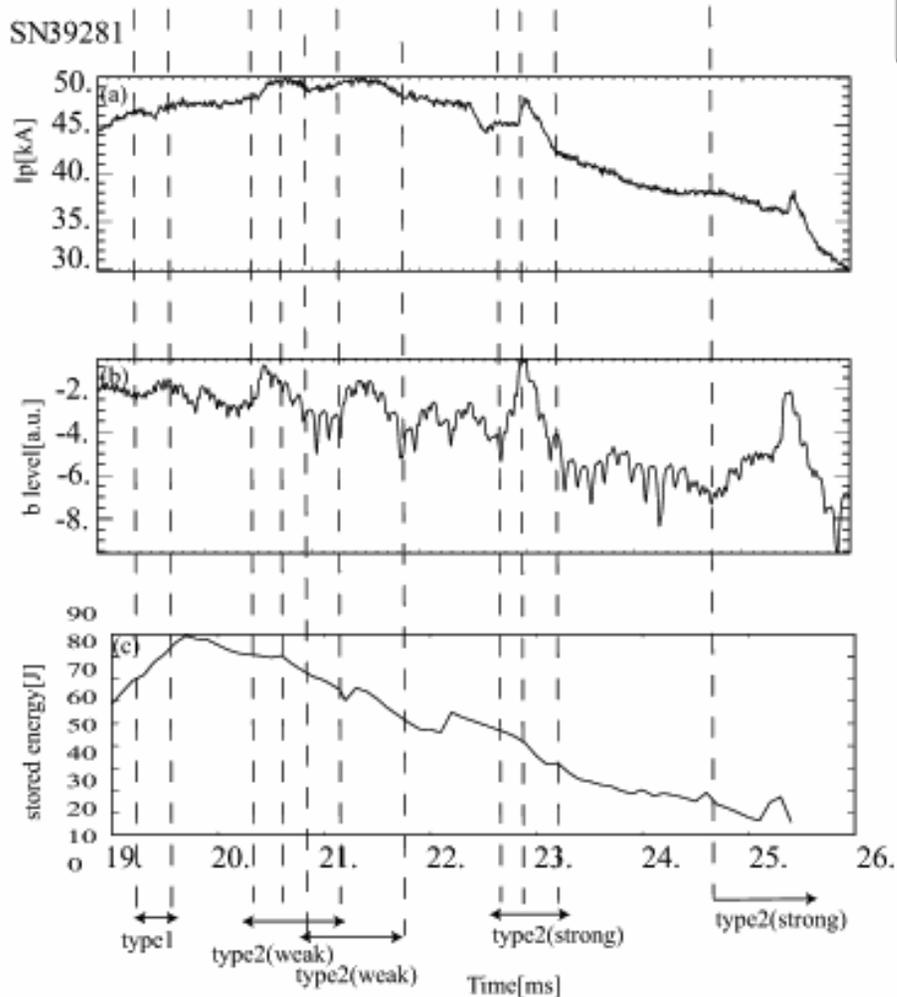


$t=23.3-24\text{ms}$

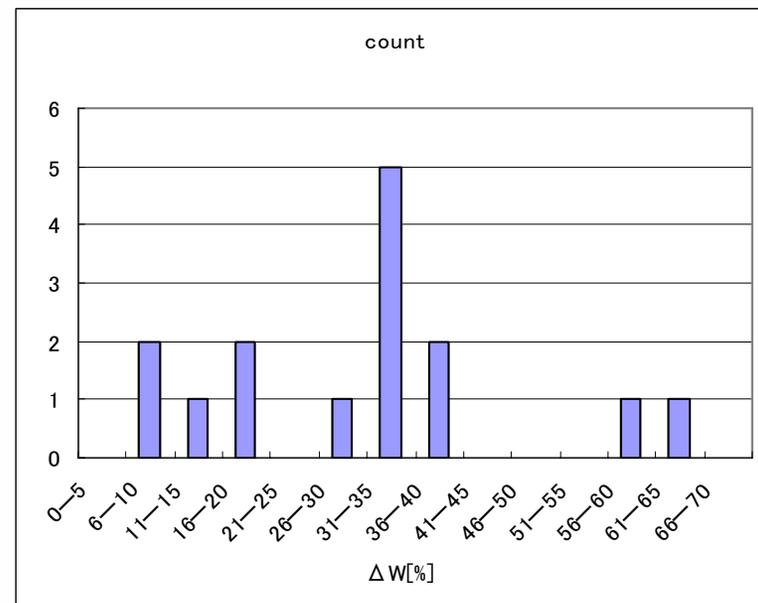


モード数がeventの前後で変化する

MHD eventsのまとめ(1)



type	$f \sim 10$ [kHz]	$f \sim 20$ [kHz]	$f \sim 30$ [kHz]
type1	$n = 1 \rightarrow n = 1$	$n = \times \rightarrow n = \times$, or $n = 1 \rightarrow n = 1$	$n = \times \rightarrow n = \times$
type2(weak)	$n = 1 \rightarrow n = 1$	$n = 1 \rightarrow n = 2$	$n = \times \rightarrow n = 2$
type2(strong)	$n = 1 \rightarrow n = 1$	$n = \times \rightarrow n = 2$	$n = \times \rightarrow n = 2$



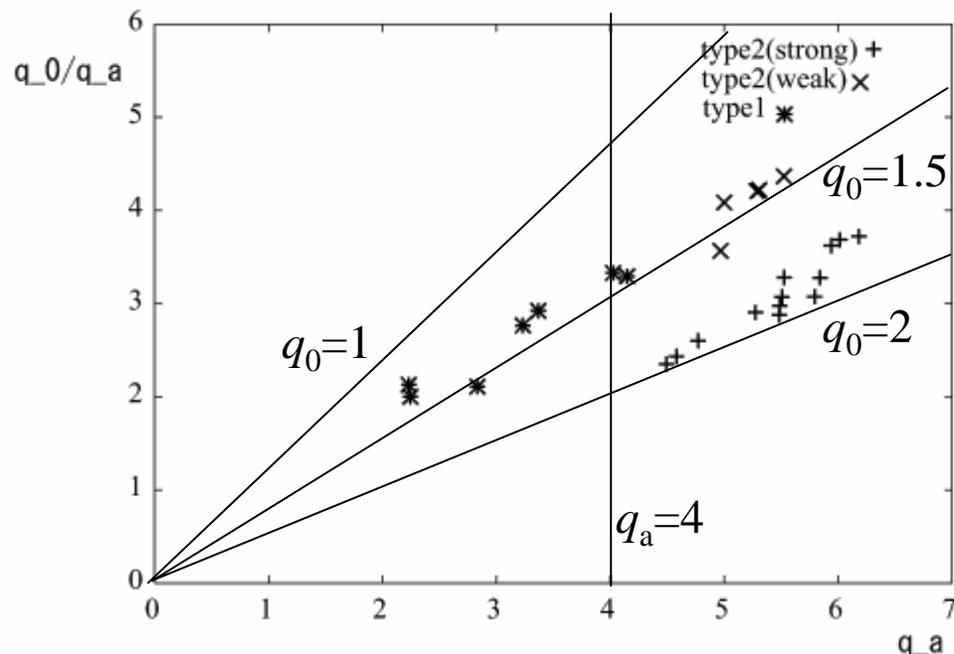
type	energy loss ΔW [%]
type1	~ 0
type2(weak)	~ 15
type2(strong)	30 ~ 60

type-2のeventはエネルギー損失大

20kHz, 30kHzの $n=2$ のモードが大きなエネルギー損失に寄与

MHD eventsのまとめ(2)

MHD eventのおきる直前でのプラズマ形状



type1: $1 < q_0 < 1.5$, $q_a < 4$

type2(weak): $1 < q_0 < 1.5$, $q_a > 4$

type2(strong): $1.5 < q_0 < 2$, $q_a > 4$

q_0 、 q_a の値のみで決まる不安定性
 q_0 が1~2の時に起きている

結論

1. 平衡解析の改良

- 渦電流の直接測定を用い有意なモード(6,7個)を決定
- diamagnetic fluxの測定し p, g の表式(多項式)を決定
→以前より少ないフリーパラメタで計算可能になった

2. MHD eventの解析

- トロイダルモード数の変化によりMHD eventは2typeに分類
- 20kHz, 30kHzでの $n=2$ のモードがエネルギー損失に重要
- 不安定性が起きる起きない、どのtypeになるかは q_0, q_a のみに依存する
- tearing mode である可能性がある
- 電流勾配により駆動される不安定性か
type1: $1 < q_0 < 1.5, q_a < 4$
type2(weak): $1 < q_0 < 1.5, q_a > 4$
type2(strong): $1.5 < q_0 < 2, q_a > 4$