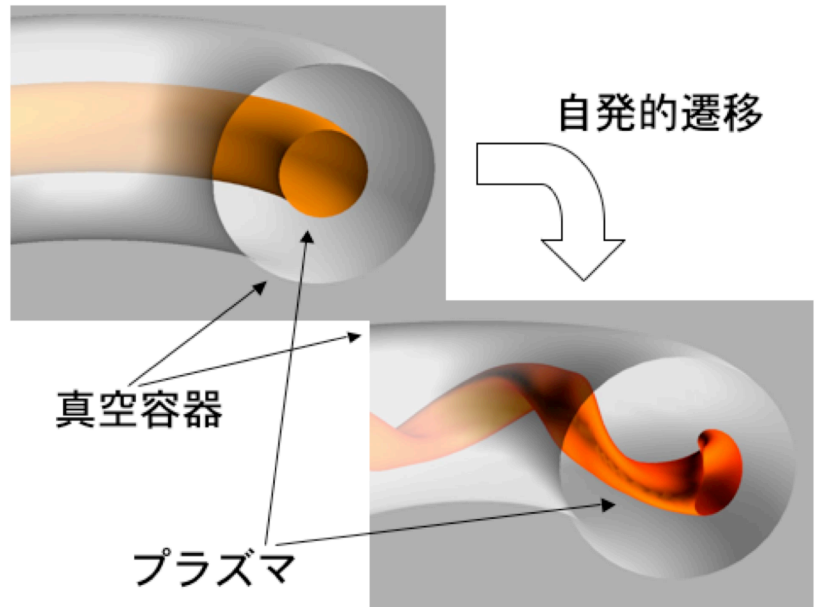
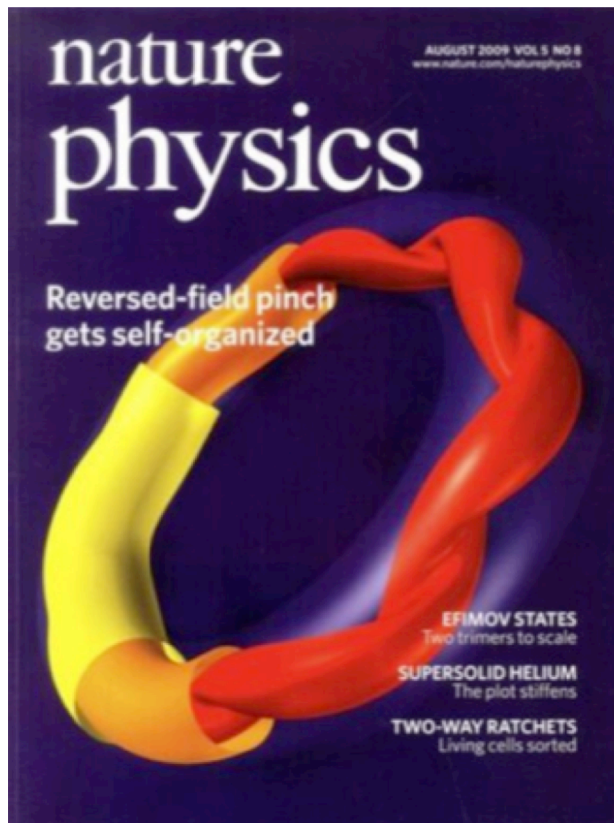
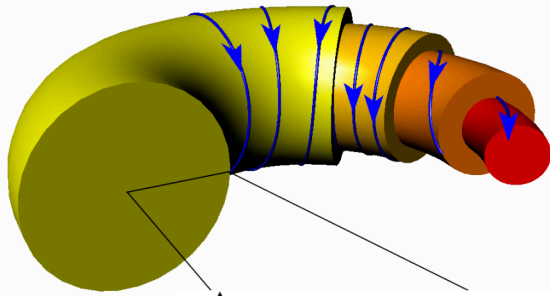


逆磁場ピンチの内部構造変化における MHD不安定性の役割

京都工芸繊維大学
三瓶明希夫



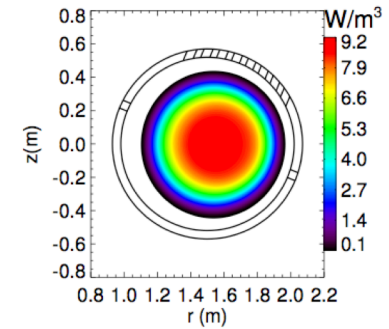
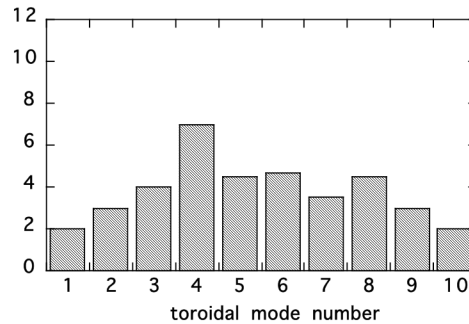
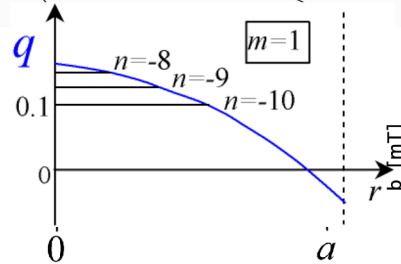
背景:RFP中の磁気カオスとヘリカル構造



RFP(逆磁場ピンチ): トロイダル磁場とプラズマ電流による閉じ込め配位

複数の $m = 1$ モード の成長(Multi-Helicity)

→ 磁気面の破壊(磁気カオス)

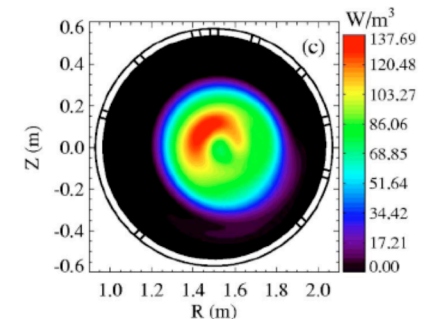
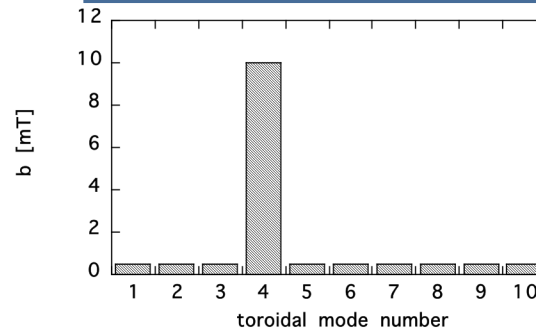
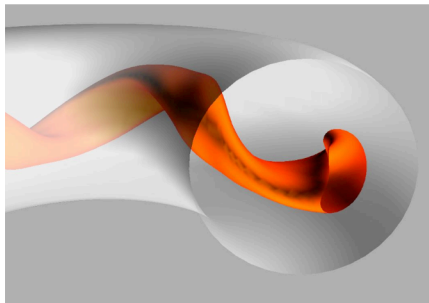


ヘリカル構造への自発的遷移

QSH(Quasi-Single-Helicity) RFP

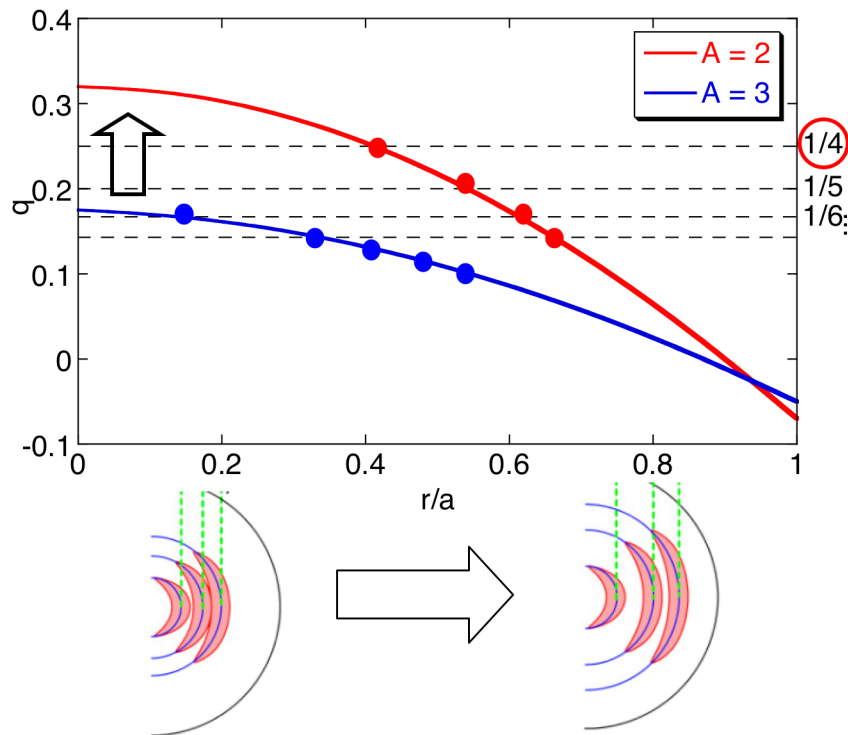
単一の $m = 1$ モード の成長

→ カオス磁場領域の縮小



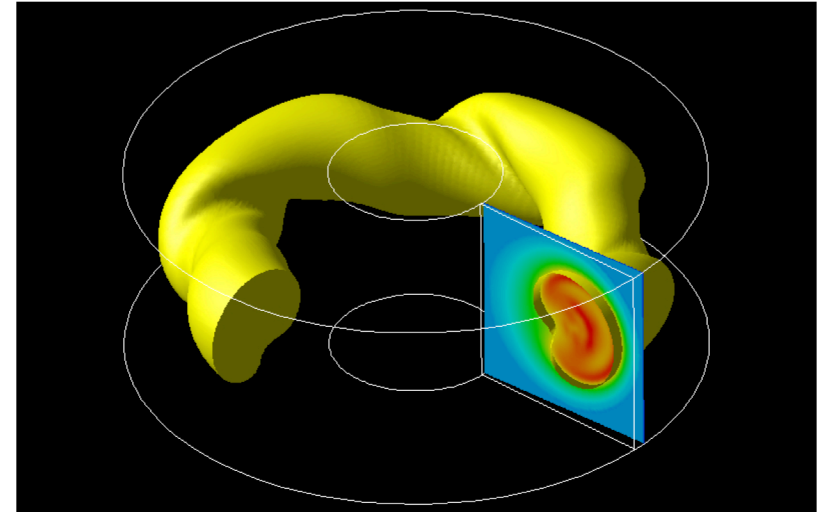
アスペクト比を低くすると ヘリカル構造が実現しやすくなる

q-profileのアスペクト比依存性

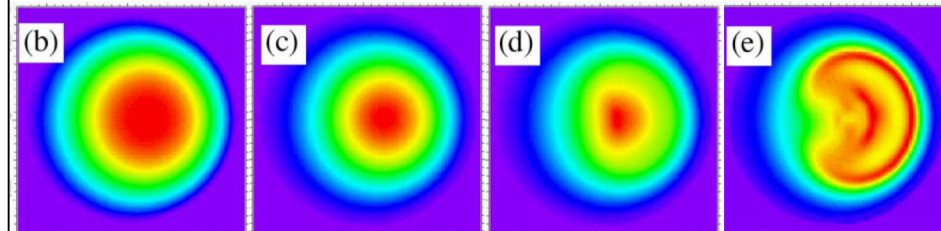


低アスペクト比化による有理面間隔増加
 →磁気カオスの低減
 →QSH実現可能性の増加

3D-MHDシミュレーション結果

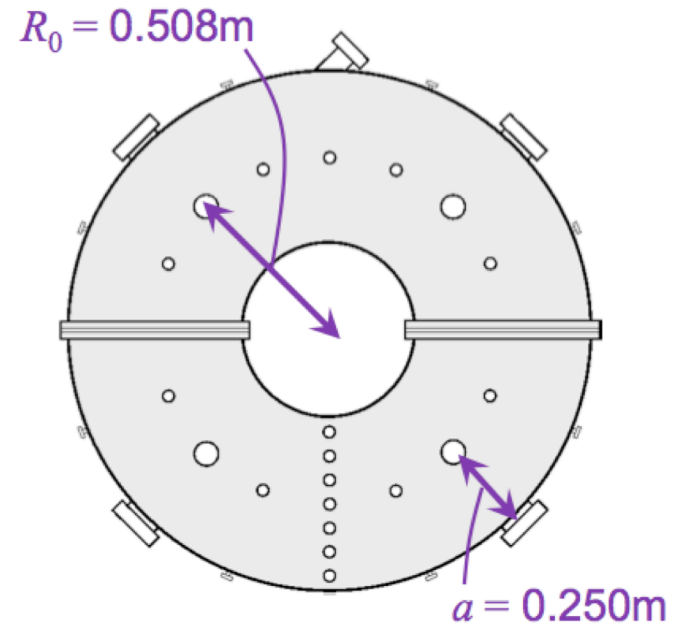
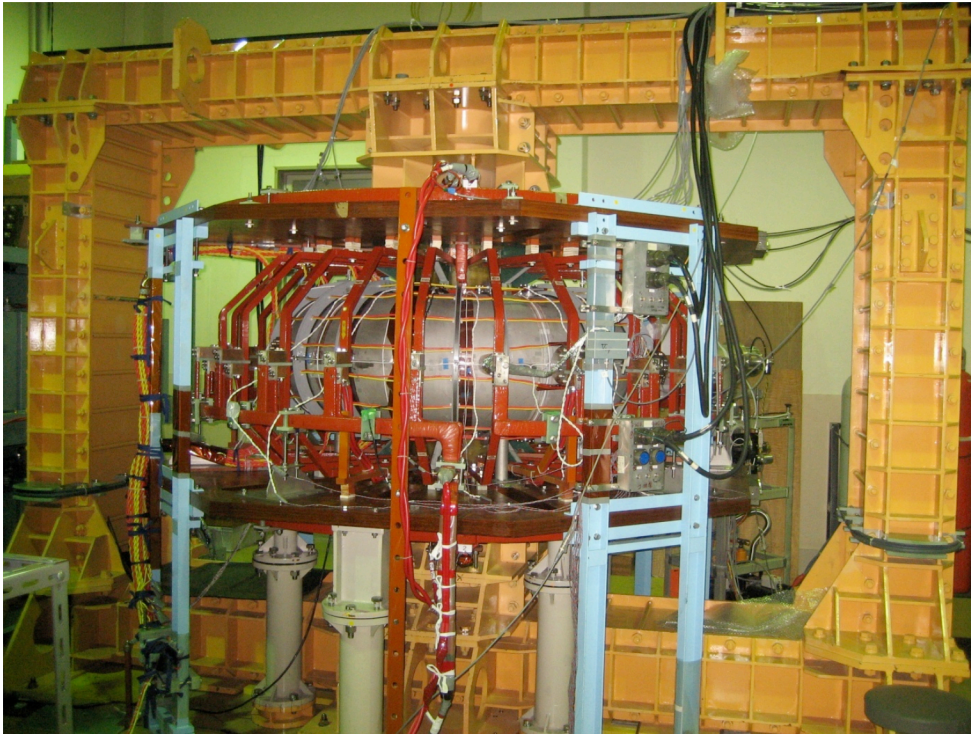


N. Mizuguchi (NIFS), Plasma Fusion Res., 7, 2403117 (2012).



自発的なヘリカル変形が観測される

REversed field pinch of **L**ow-**A**spect-ratio **eX**periment



top view of vacuum vessel

Vacuum vessel: SS (4mm t)

Penetration time: ~2ms

R : 0.508 m

a : 0.25 m

A : 2

Circular poroidal cross section

Plasma current : ~120kA

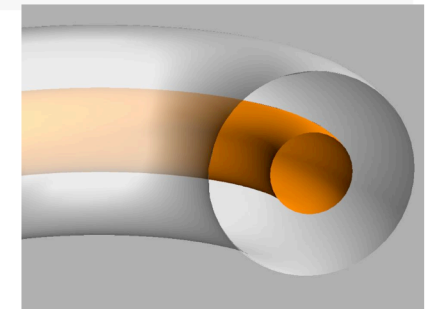
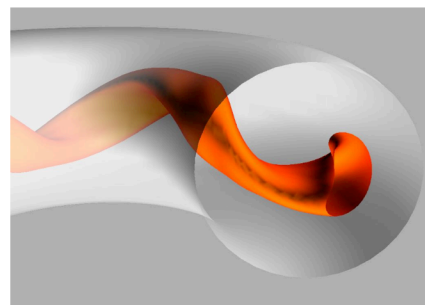
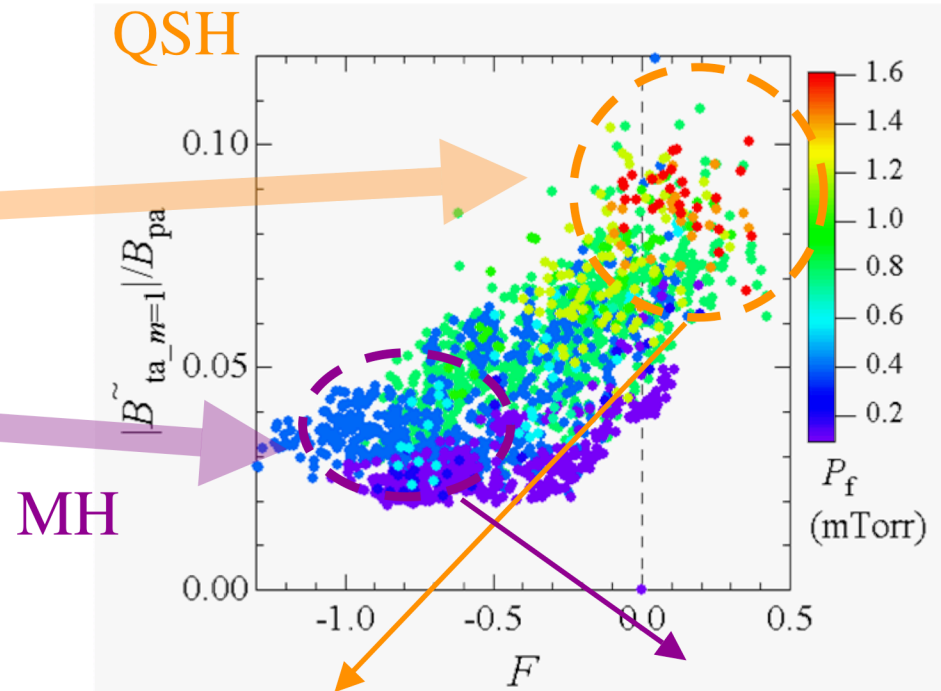
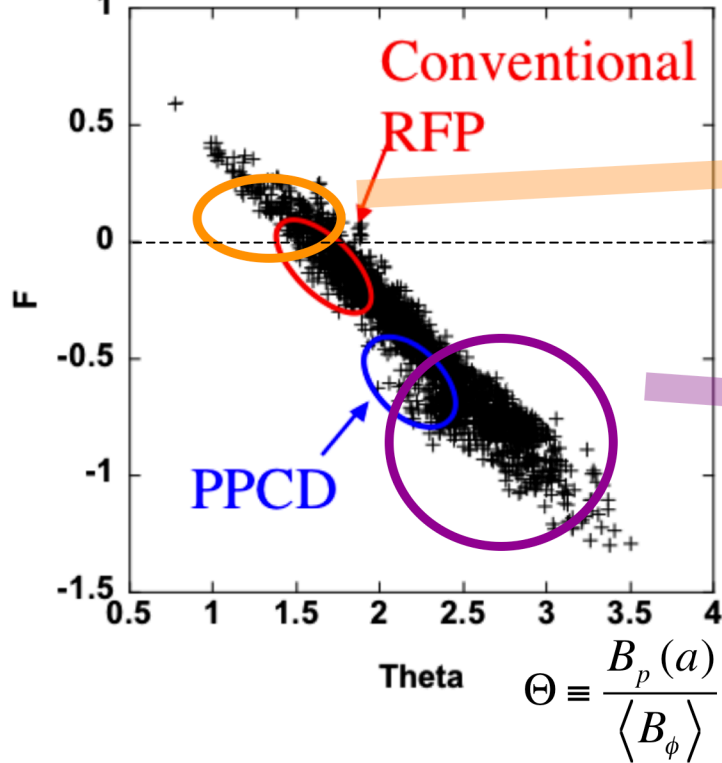
Electron density: $10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

Electron temperature: ~100 eV

Discharge duration: ~2.5 ms

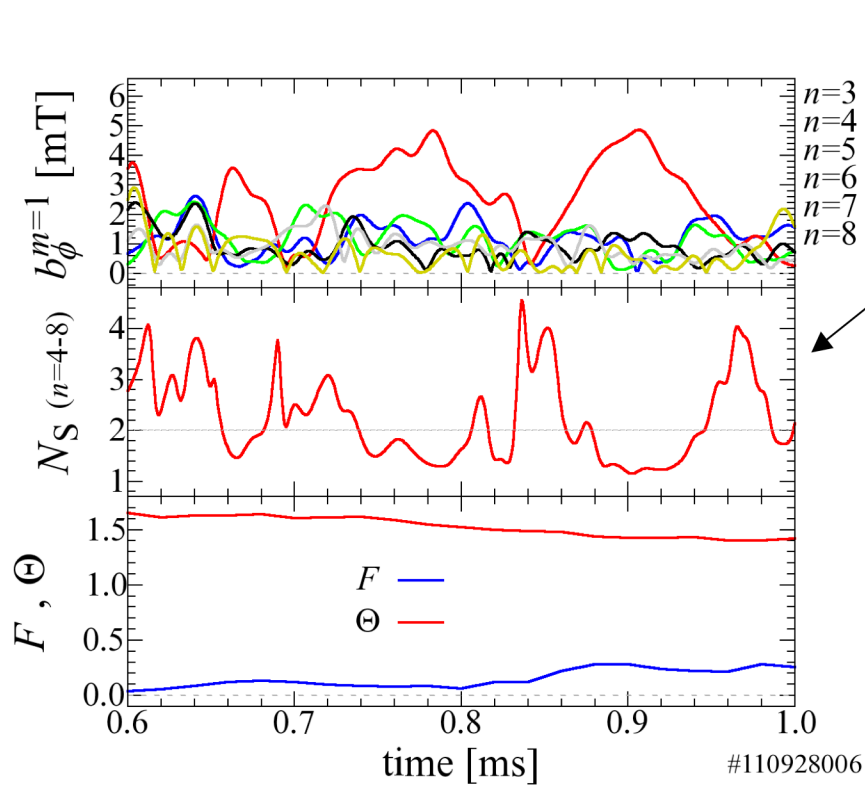
Operation regimes in (Θ, F) space in RELAX

$$F \equiv \frac{B_\phi(a)}{\langle B_\phi \rangle_1}$$



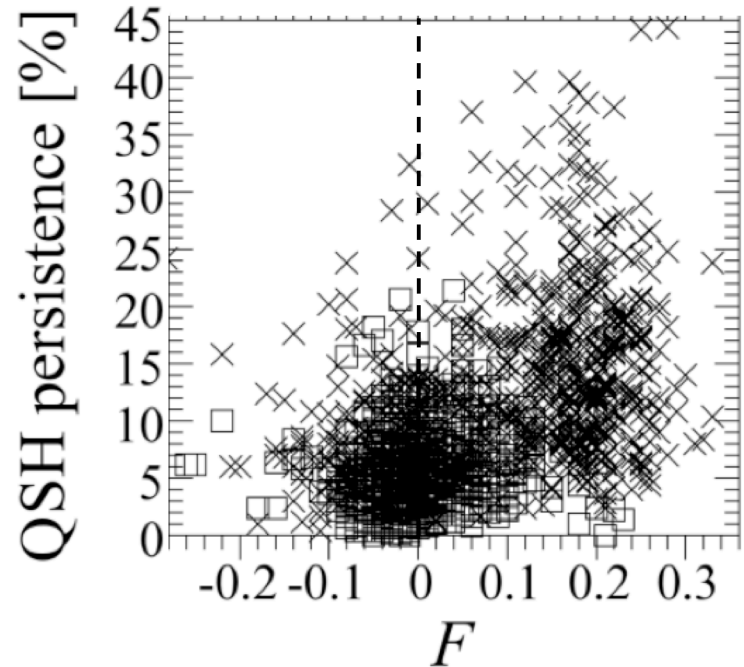
F と Θ には強い相関がある
 反転が浅いと揺動が大きい
 反転が深いと揺動が小さい

反転が浅い放電でQSHが現れる



Spectral index:

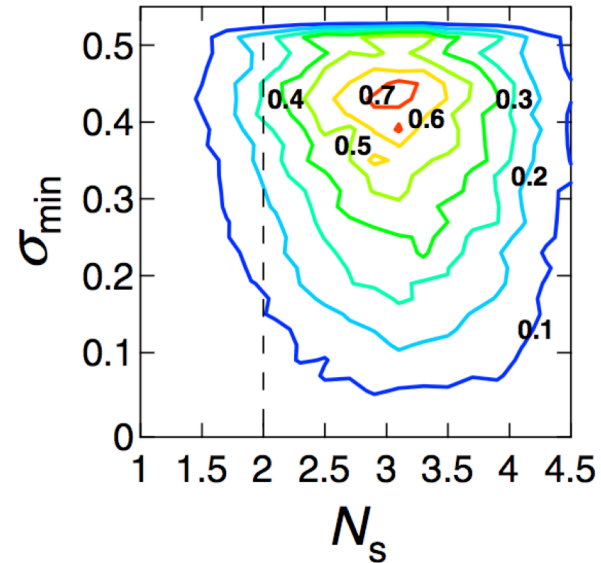
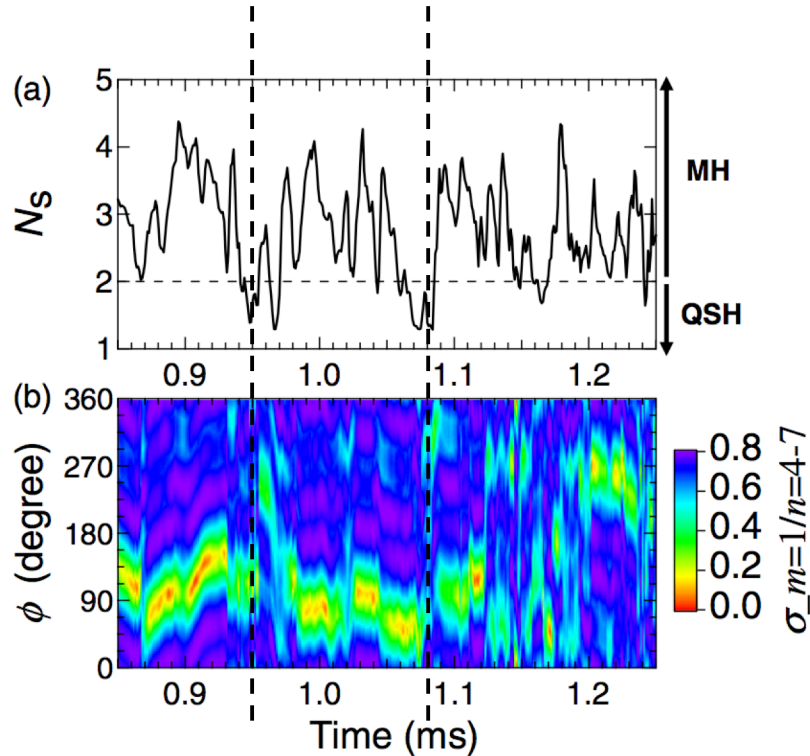
$$N_s = \left[\sum_{n=n_{\min}}^{n_{\max}} \left(\frac{b_{1,n}^2}{\sum_n b_{1,n}^2} \right)^2 \right]^{-1}$$



反転が浅い放電では準周期的な
QSH 状態が観測される。

反転が浅くなるほど、QSH状態
ある時間が多い。

QSHへの遷移と位相ロックの解除は同時に起こる

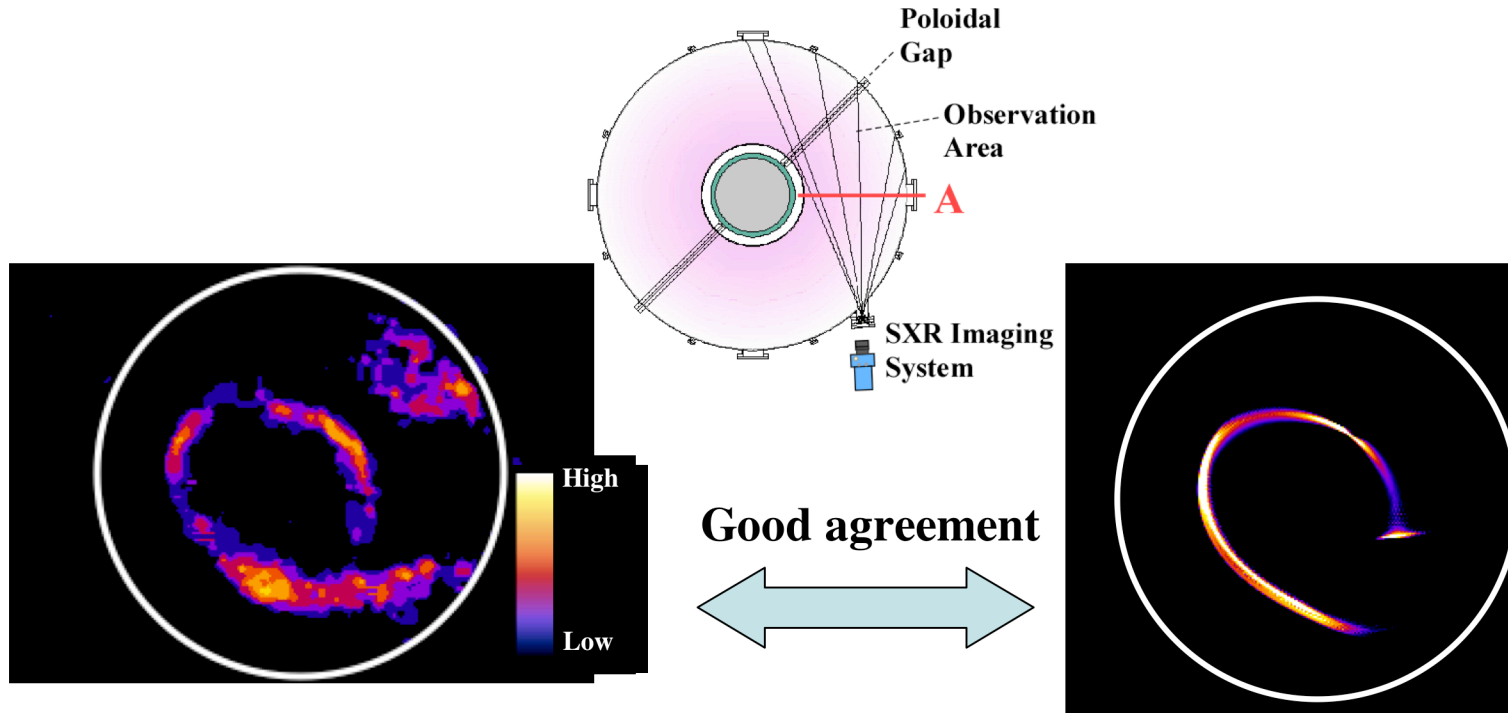


R. Ikezoe et al., JPSJ, 81, 115001 (2012).

$$\sigma(\phi) = [1 + 2 + \dots + (n_{\max} - n_{\min})]^{-1} \times \sum_{j=n_{\min}}^{n_{\max}-1} \sum_{k=j+1}^{n_{\max}} \left| \sin \left[\frac{\Phi_j(\phi) - \Phi_k(\phi)}{2} \right] \right|$$

$m=1$ モードの集団的な振る舞いと
ヘリカル構造の遷移には相関がある

SXR放射源分布の揺動成分はヘリカル構造になる



Experimental image:

揺動によるヘリカルSXR放射分布
(連続する画像の差をとることで
揺動分の寄与を引き出す)

Calculated image:

$m=1/n=4$ 磁気島を仮定した場合のSXR
画像.

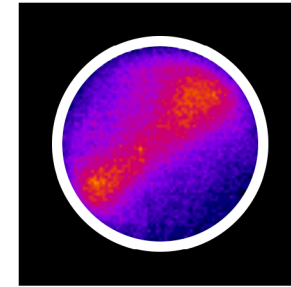
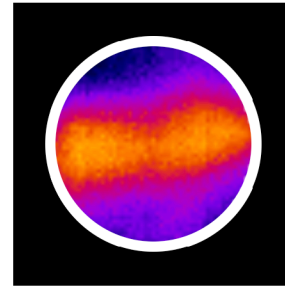
A. Sanpei et al., IEEE Transaction Plasma Science, 39, 2410 (2011).

揺動成分はシンプルなヘリカル構造を持つ.

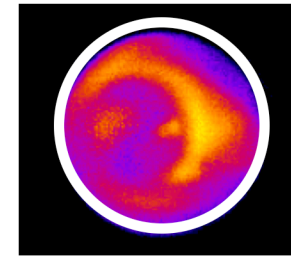
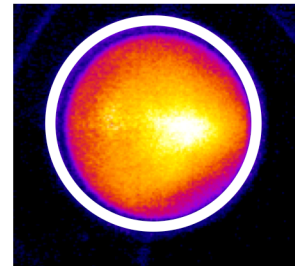
反転が浅いとSXR放射源分布はヘリカル構造になる

$F \sim -0.5$

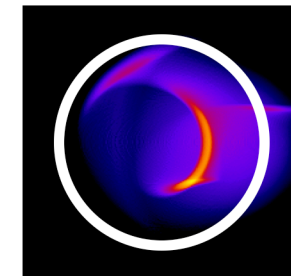
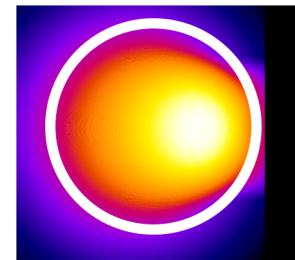
$F \sim 0$



垂直

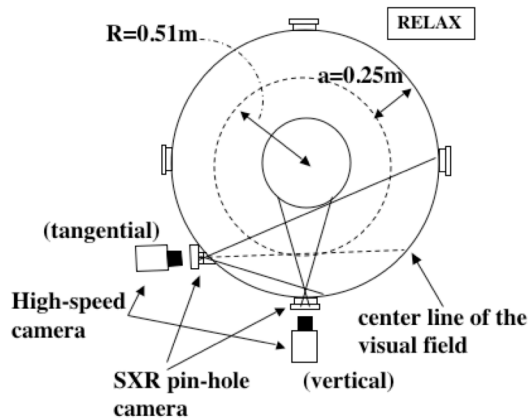


接線

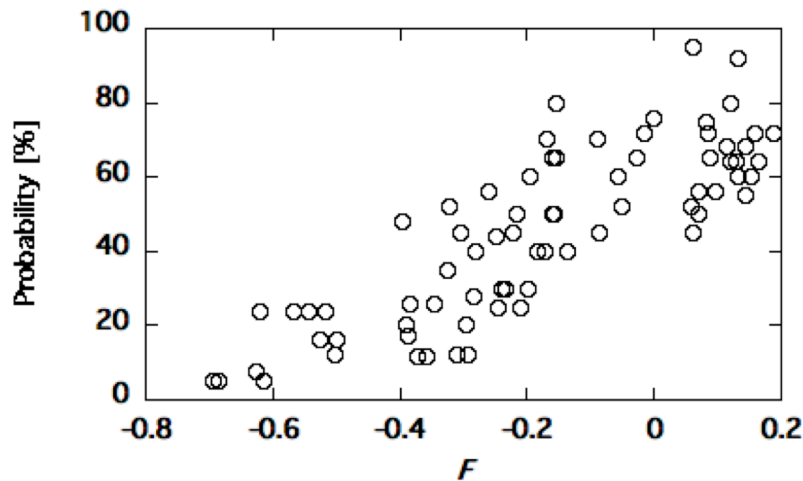


計算結果
(接線)

周辺磁場揺動計測と対応する傾向をもつ

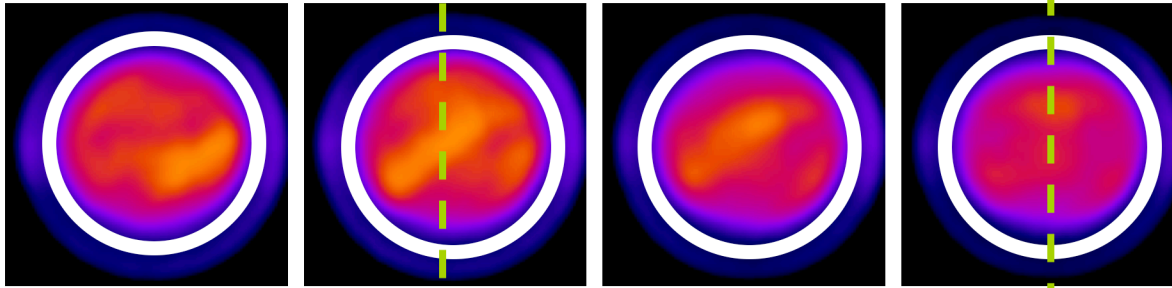


SX画像計測における
フィラメント構造観測確率



QSH時の磁気面はヘリカル構造を持つ

vertical



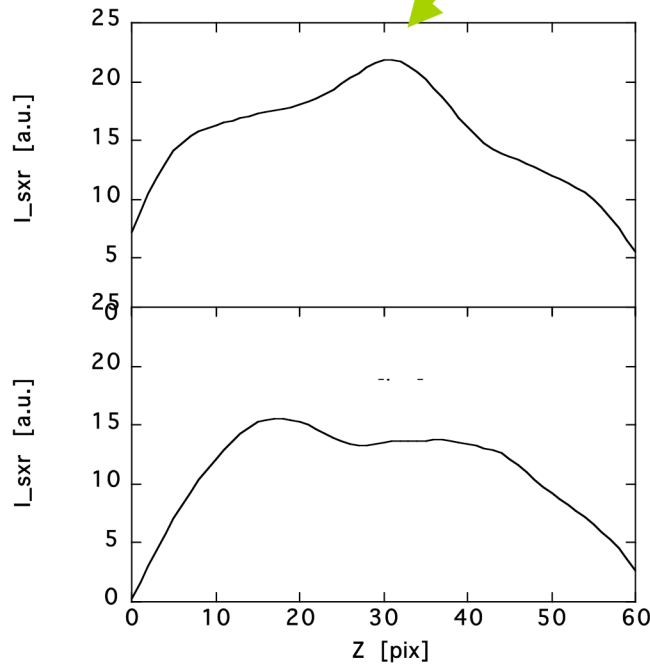
1.22ms

1.24ms

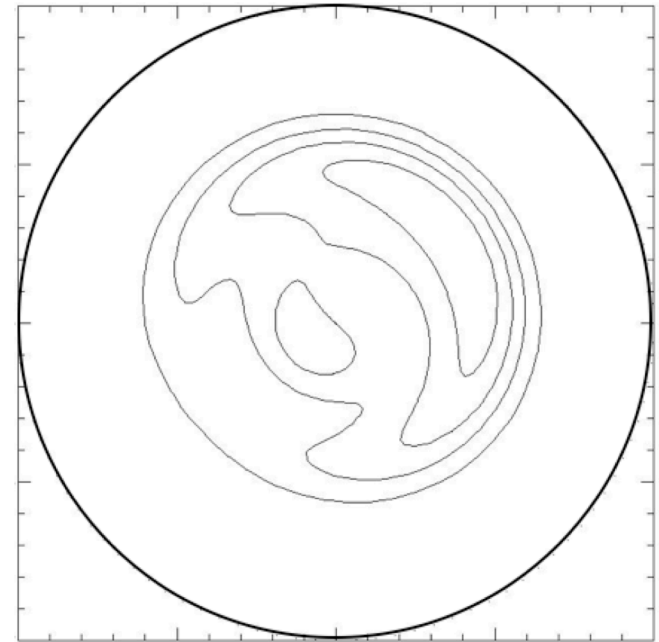
1.26ms

1.28ms

- 視野の外は信号0
- 剛体回転を仮定
- Fourier-Bessel法

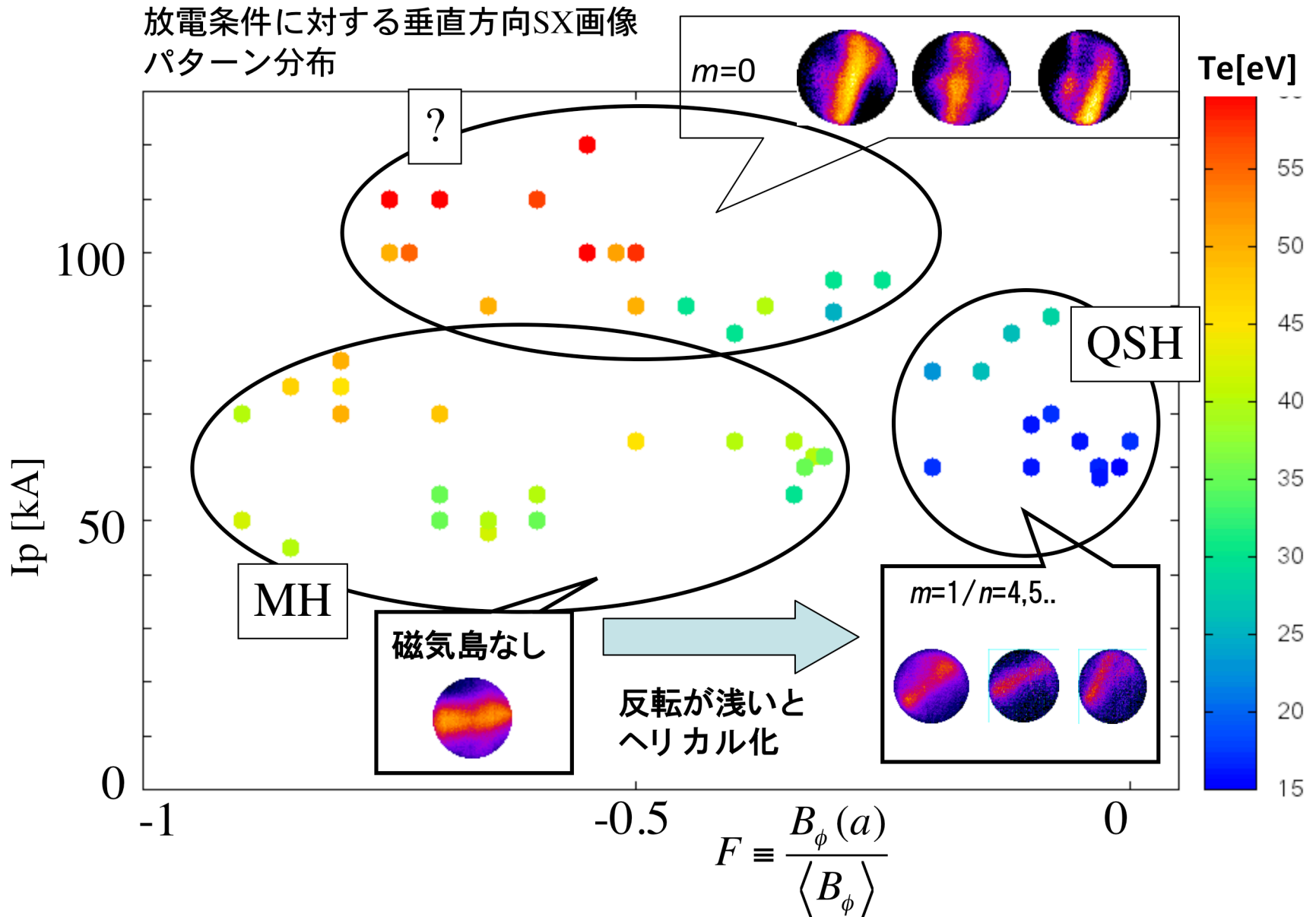


CT

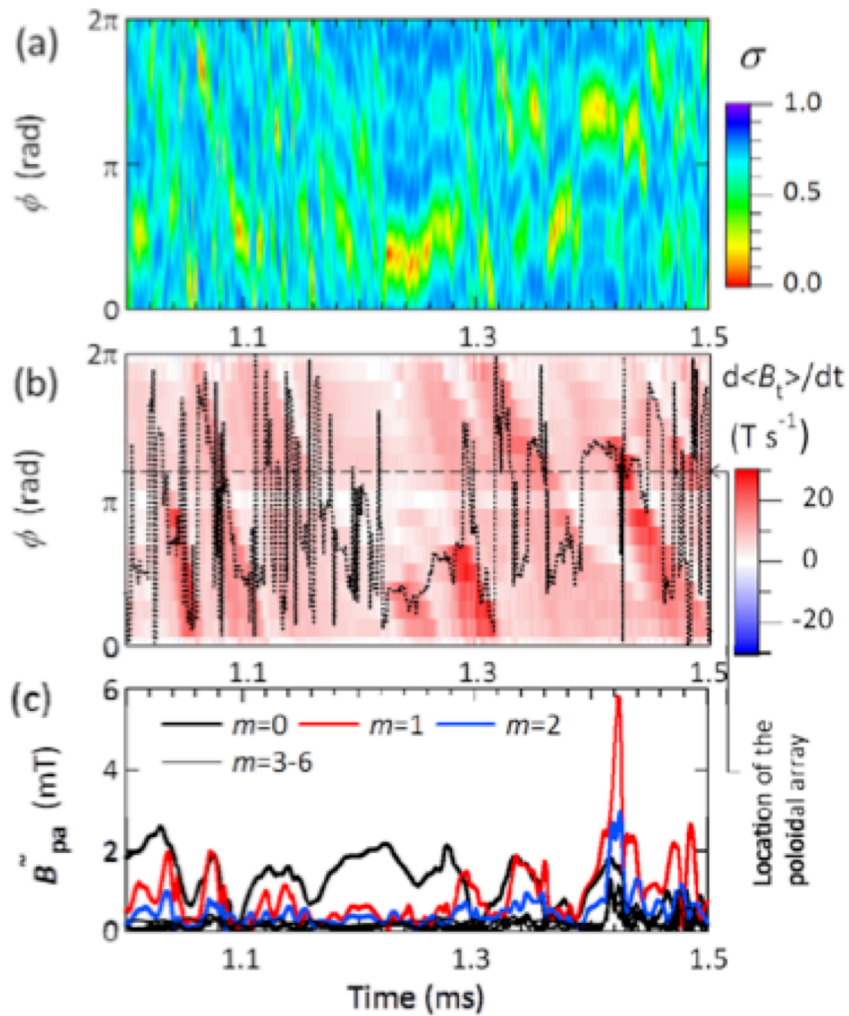


$m=1$ 起因の大きな磁気島構造が得られた

反転が浅いとヘリカル構造になる



縦方向の構造は局所的なダイナモが原因か



ダイナモは位相ロックが起こる場所で局所的に生じる。
 $m=0$ の構造がトロイダル方向に回転する。

ロックとダイナモは同時に生じる

ローカルなダイナモ ($m=0$ 生成)

$m=1$ 位相ロック

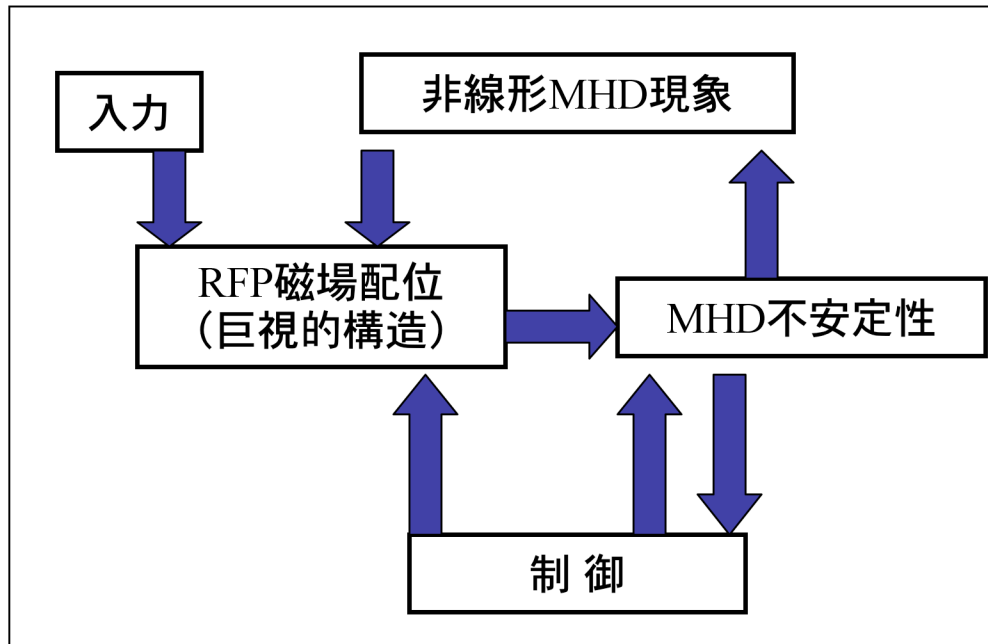
?

遷移するとロック解除

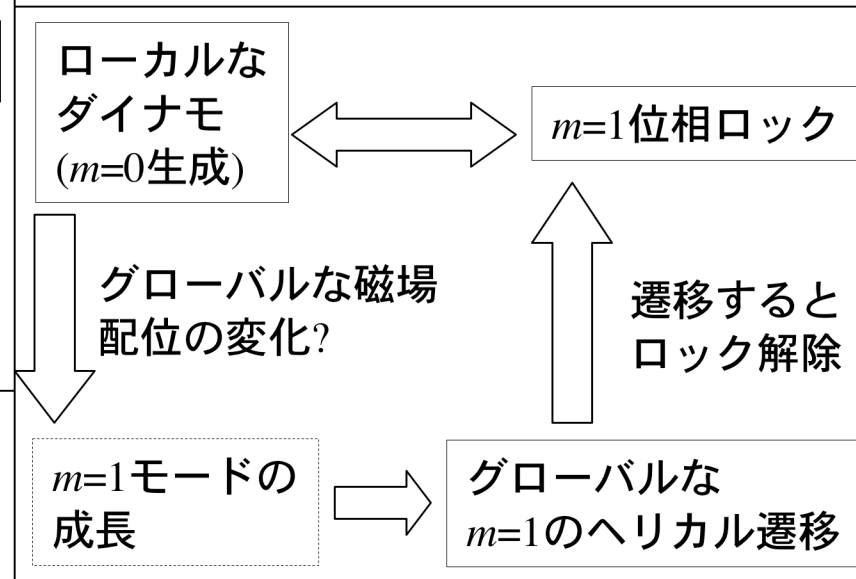
グローバルな $m=1$ のヘリカル遷移

$m=0$ とヘリカル遷移の関係は？ (unknown)
 今後調べる必要がある

自己組織化するRFPプラズマのダイナミクス



駆動系, 自己組織系プラズマに外部からエネルギーを注入
→自由エネルギーが増加
→不安定性の成長
→非線形現象が支配的になる
→もとのグローバルな磁場構造 (RFP配位) が変化

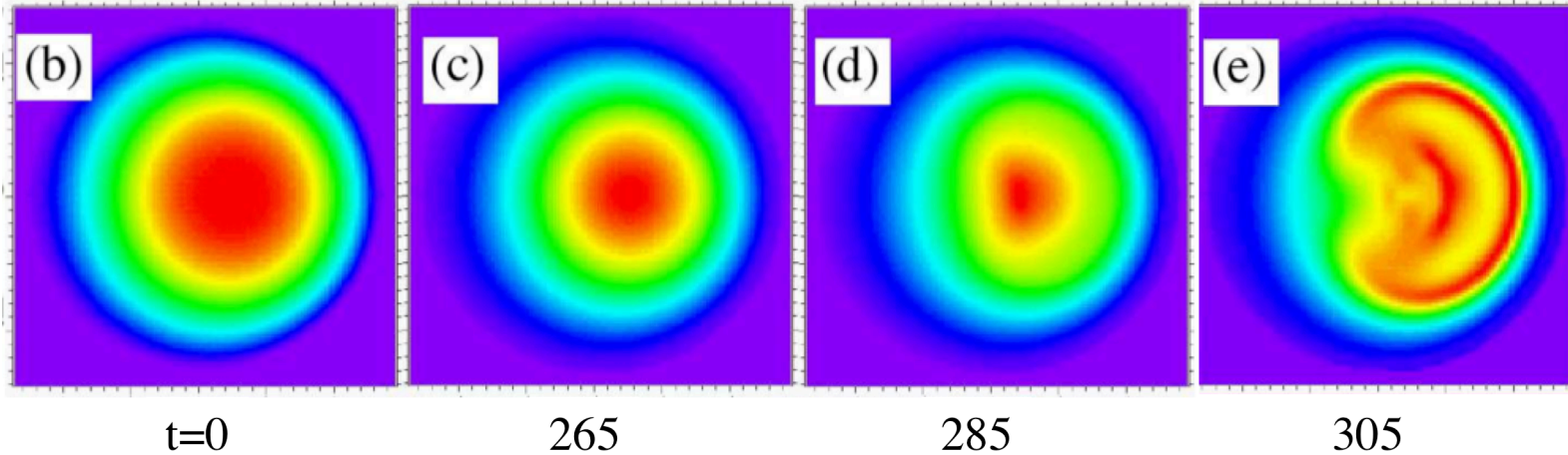


単一モードの成長だけでなく複数モードの相関も重要

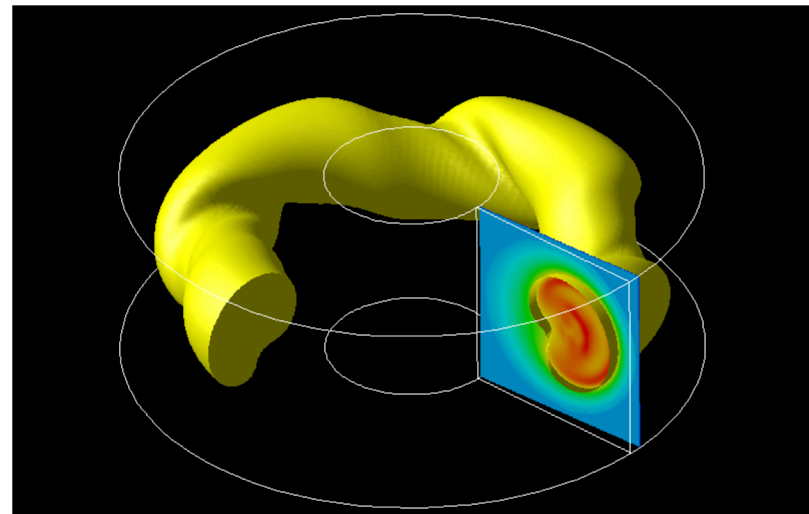
3-D MHD computation results for $A=2$ RFP

N. Mizuguchi (NIFS), Plasma Fusion Res., 7, 2403117 (2012).

Snapshots of the pressure profile on poloidal cross-section.

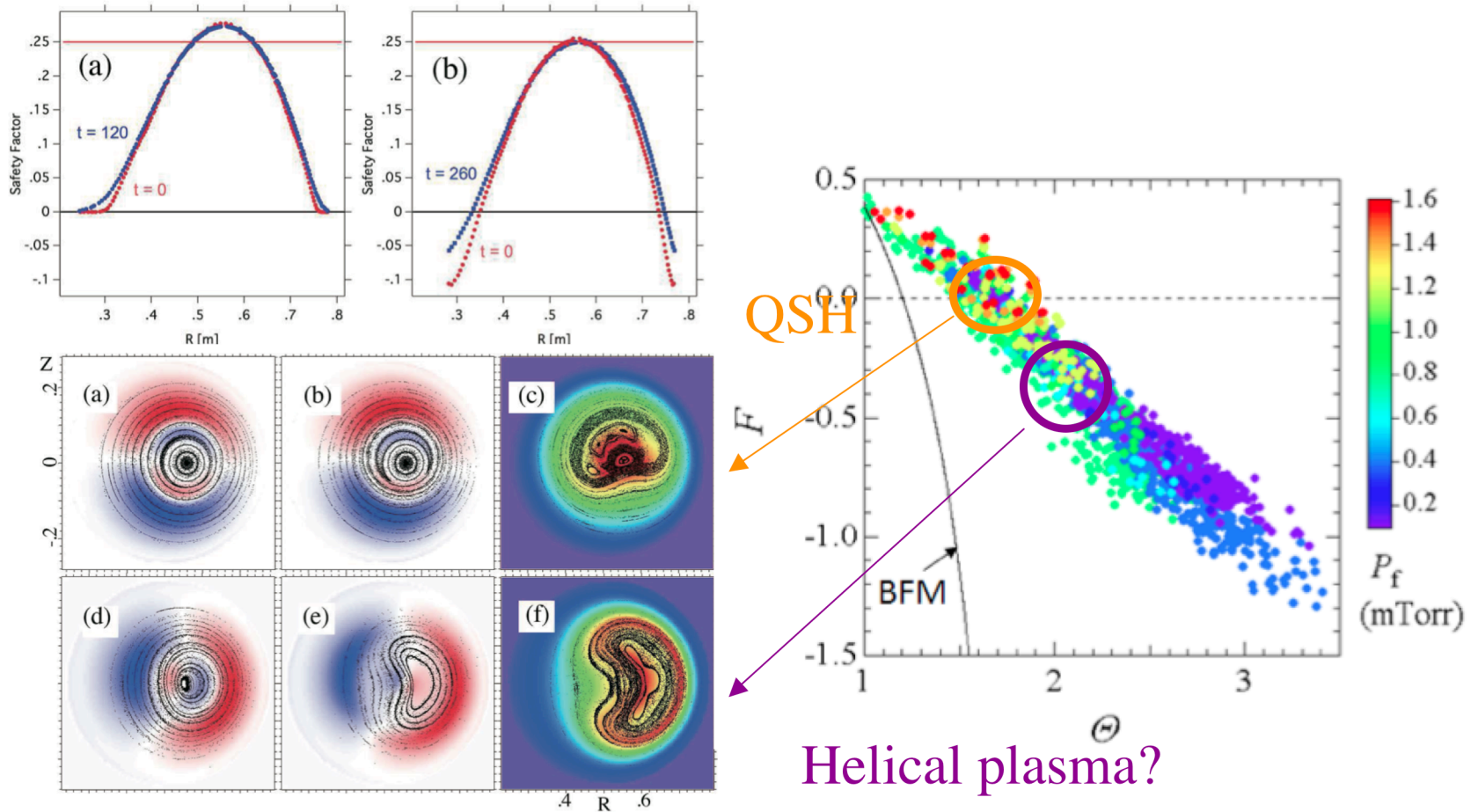


そら豆型で、かつホローな、ポロイダル圧力分布をもつ、特徴的なヘリカル構造を形成する



Helical deformation ($m=1/n=-4$) of equi-pressure surface appears.

3-D MHD computation results for $A=2$ RFP



共鳴モード，非共鳴モードいずれの場合においても，特徴的なヘリカル構造を形成する。

これらの構造は，キックモードによる大域的な流れによりコア部で引き起こされる磁気リコネクションを通じて形成される。

まとめ

低アスペクト比RFP装置RELAXにおける3次元的構造計測を目的として、周辺磁場揺動計測とSX画像時間発展計測を行った。

周辺磁場揺動計測とSX画像が得られた。

ヘリカル構造は反転が浅い放電で観測される。

QSH放電時のSX画像からCTを行った。

$m=1$ 起因の磁気島構造が得られた。

高い電流の放電領域では $m=0$ の構造が現れた。

局所的なダイナモとその伝搬が原因と予想される。

3D-MHDシミュレーションでは比較的広い放電領域でヘリカル変形が観測された。

実験とのより詳細な比較が必要である。