

画像計測による低アスペクト比RFPのダイナミクス研究

第11回若手科学者によるプラズマ研究会
2008年3月18日(火)

京都工繊大工芸科学研究科, 広島大工¹⁾

恩地拓己, 西野信博¹⁾, 池添竜也, 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

発表内容

- ・研究背景
- ・“RELAX”における高速カメラ実験
- ・可視光ヘリカル構造の発見
- ・ヘリカル構造と $m=1$ モードの関係
- ・軟X線画像計測システム
- ・まとめ

RFPの低アスペクト比化

- ・中心部で平坦, 周辺部で急峻な q 分布
- 主要モード有理面間隔の拡大
- **磁気島の重なりが起きりにくくなる**
(磁気カオス領域の拡大を防ぐ)
- ・「準シングルヘリシティ(QSH)状態」(準単一モード状態)に遷移しやすい

理論的予測

内部構造の診断

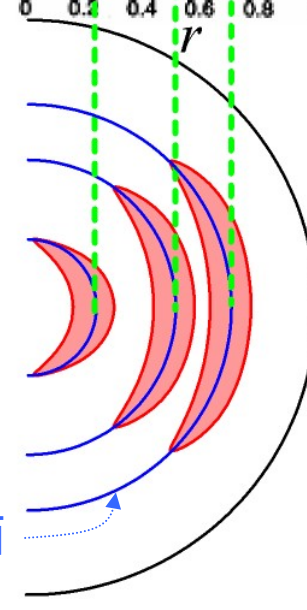
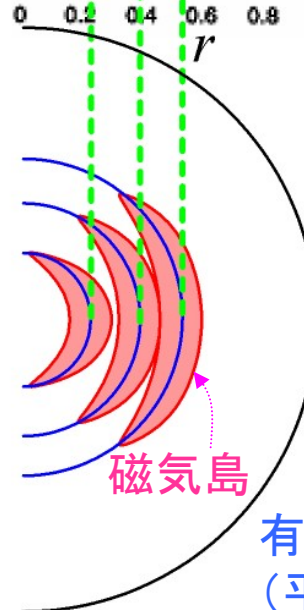
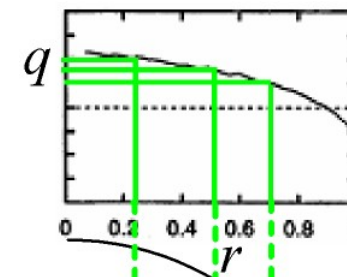
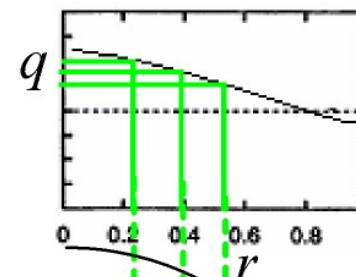
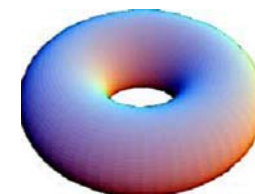
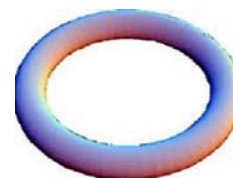
近年, 高速カメラを用いた可視光画像計測による不安定性や乱流構造の研究が, 磁気閉じ込めプラズマ装置において盛んである.

* 画像計測によって低アスペクト比RFPプラズマ実験装置“RELAX”で内部構造を診断

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



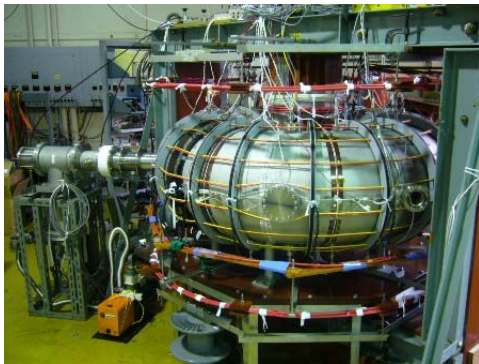
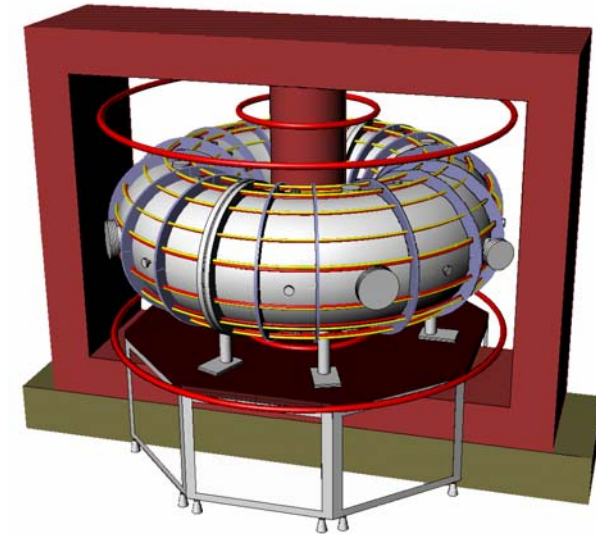
有理面
(平衡)

低アスペクト比RFP実験装置

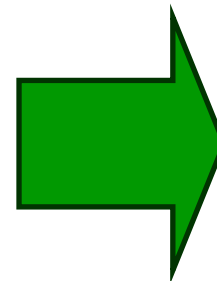
RELAX

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

- 大半径 = 50cm
- 小半径 = 25cm
- RFP装置としては
世界最小アスペクト比 $A=2$
- 放電時間: $\sim 2\text{ms}$



運転期間: 2006年9月～2007年8月



運転期間: 2008年1月～

高速カメラによるRELAXプラズマの画像計測



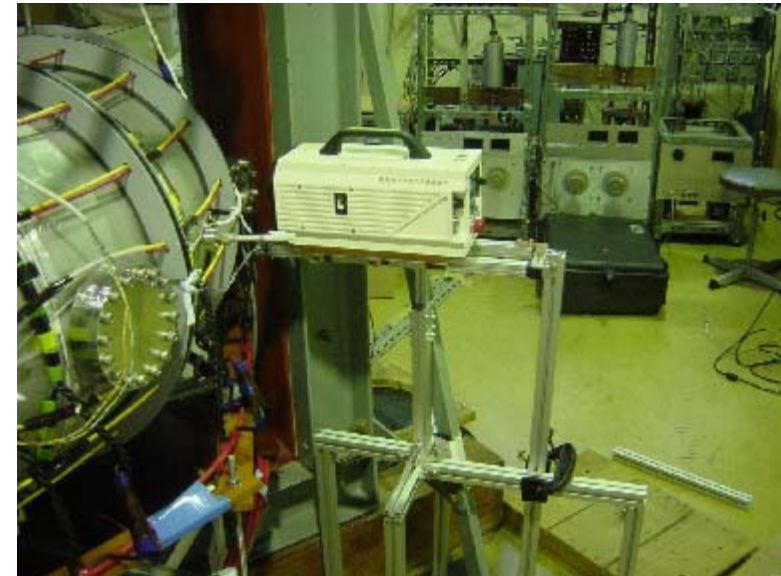
高速カメラ : MEMRECAM fxK4
検出素子: CMOS (monochrome)

80,000 frames/second, 96 × 80 pixels

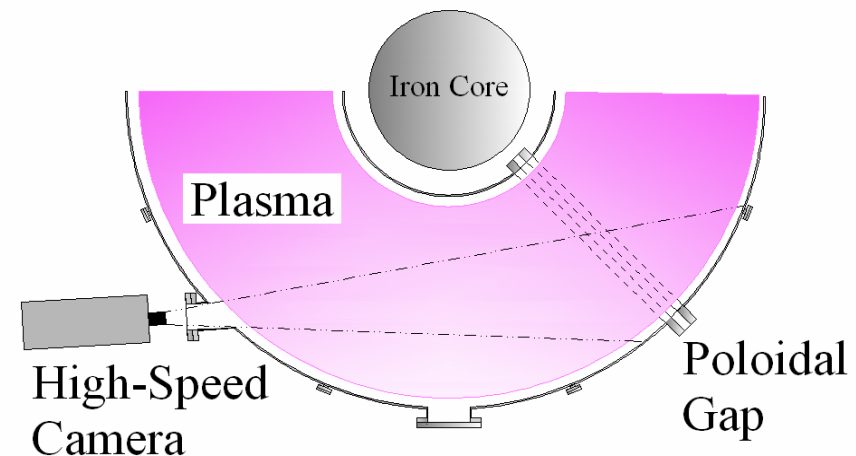
or

105,000 frames/second, 64 × 64 pixels

* 本実験は広島大工, 西野信博先生との
共同研究

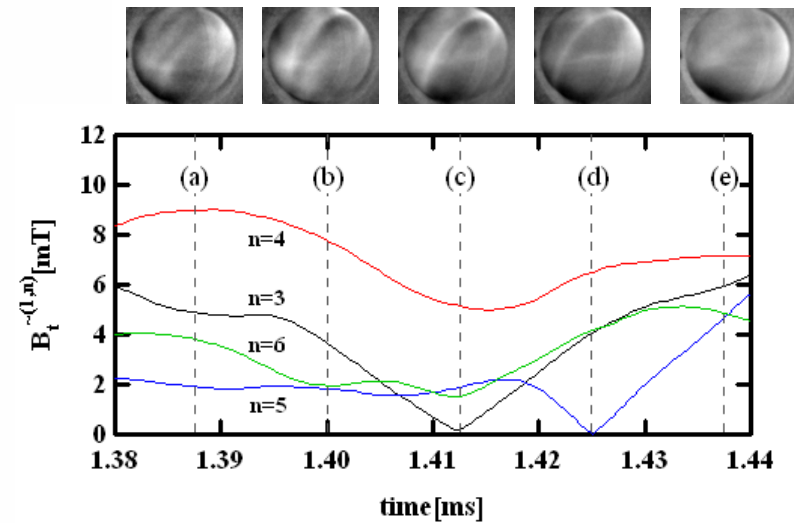
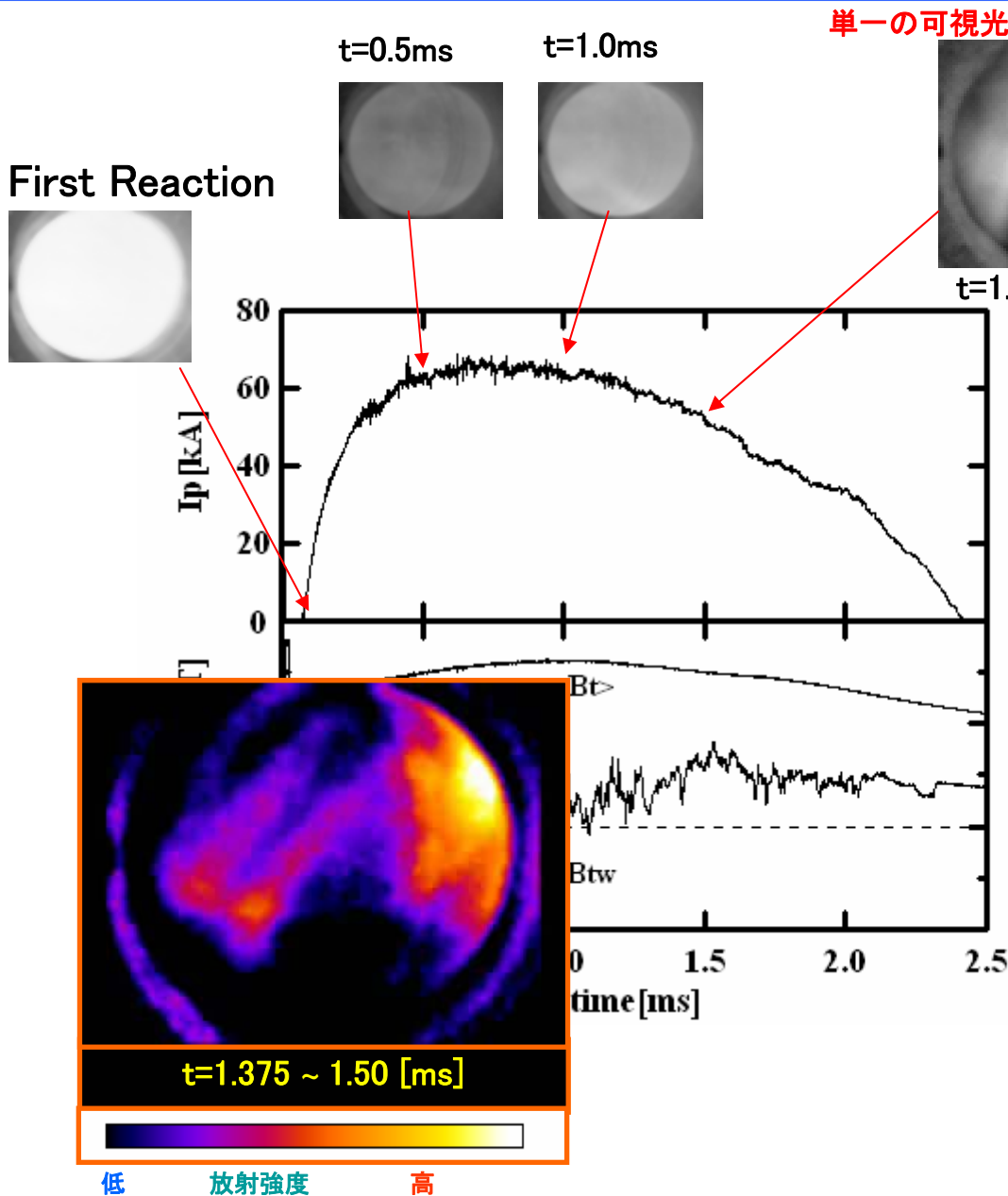


実験セットアップの写真



高速カメラの視野

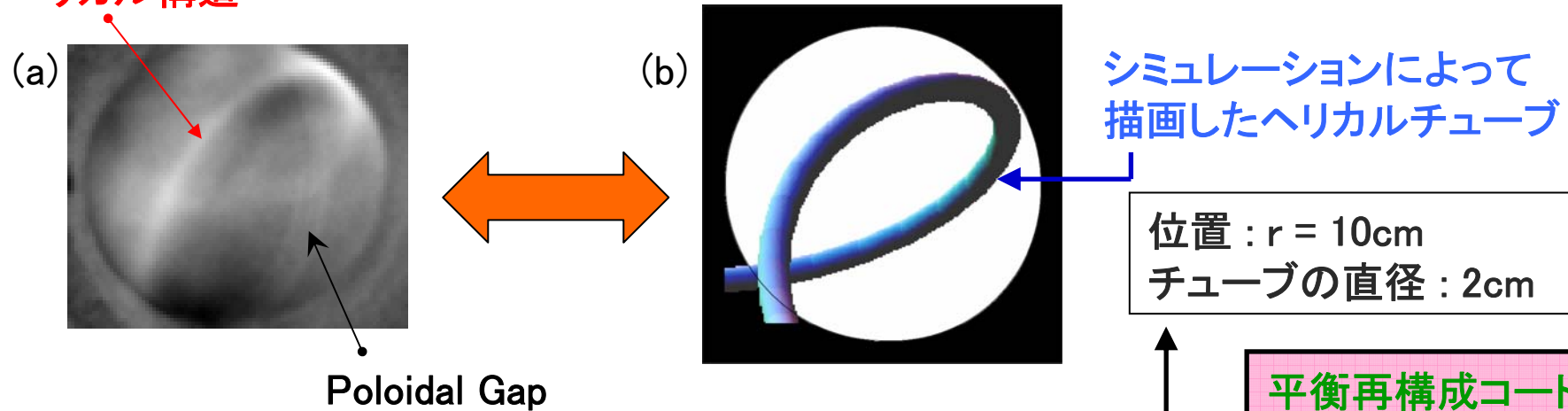
可視光ヘリカル構造の発見



ヘリカル構造は $m=1/n=4$ モードの有理面上に存在している？

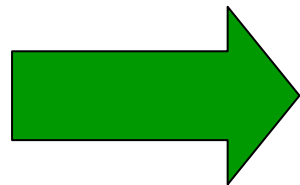
観察されたヘリカル構造とシミュレーションの比較

ヘリカル構造



(a) RELAXの接線ポートにおいて高速カメラで観察された($t=1.4125\text{ms}$)シンプルな可視光ヘリカル構造

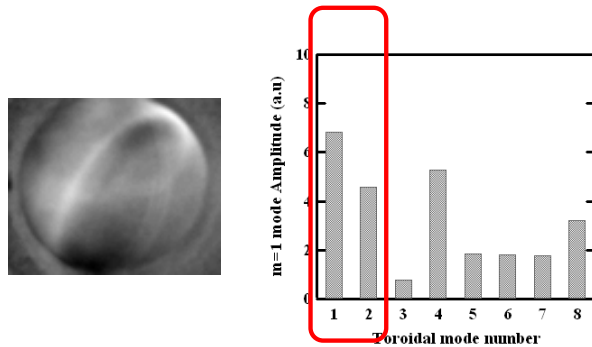
(b) $(m,n)=(1,4)$ モード有理面上にあると仮定したヘリカルチューブ



ヘリカル構造は $m=1/n=4$ モード有理面上にあると考えられる

- *放射強度がヘリカルチューブ内で同程度である
→ 密度と温度の構造と予想される
- *シンプルな共鳴モード構造を示唆

内部非共鳴モードの影響



RELAXプラズマにおける平均自由行程

4cm ($n_e=10^{13}\text{cm}^{-3}$ and $kT_e/e=50\text{eV}$) ~

75cm (for $n_e=10^{12}\text{cm}^{-3}$ and $kT_e/e=20\text{eV}$)

内部非共鳴モード(n=1,2)が大きく成長している

プラズマ柱がヘリカル変形し、壁と触れる。
→中性粒子が飛び出し、その場所で発光？

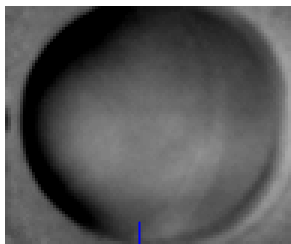


壁から飛び出した中性粒子は拡散するため、平均自由行程のオーダーで考えれば局所的な発光の原因にはならない

- ・成長した内部非共鳴モードはヘリカル構造の原因ではないと考えられる
- ・内部への中性粒子の注入の役割を果たす

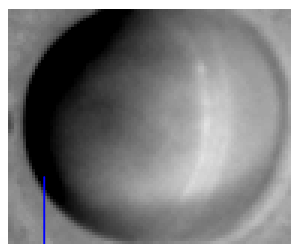
可視光ヘリカル構造の振る舞い

Not RFP



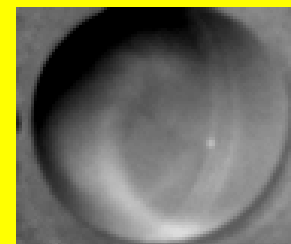
~0.25ms (0.2625)

RFP配位

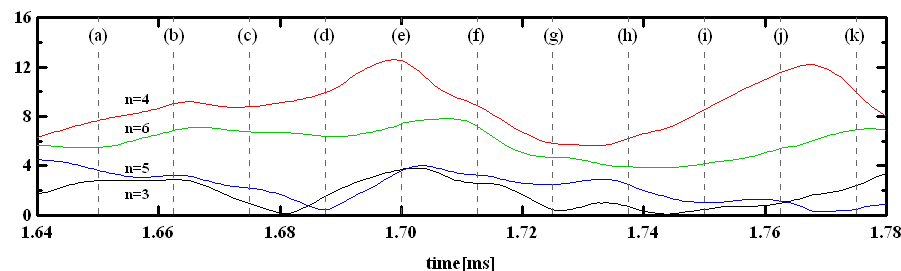
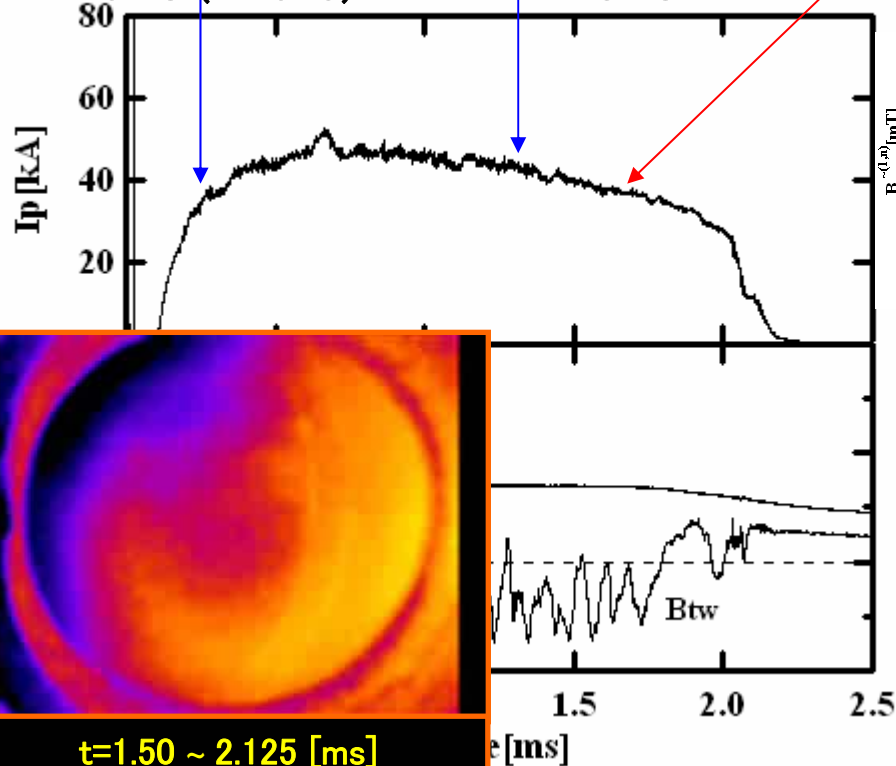


1.3ms

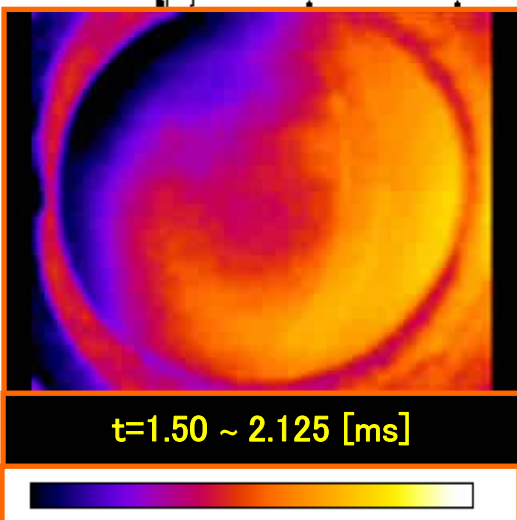
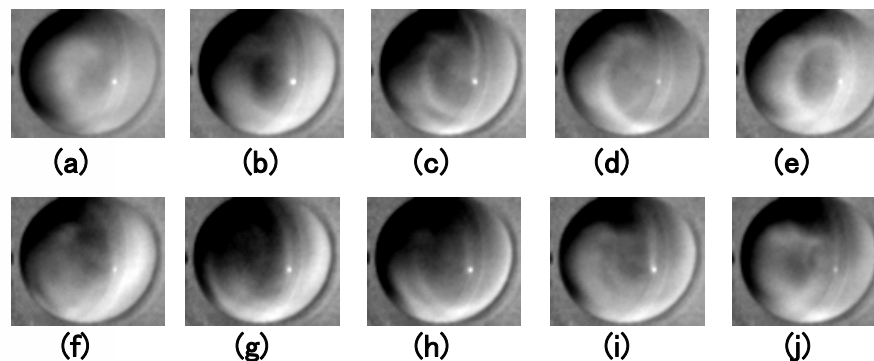
可視光ヘリカル構造



~1.7ms (1.6875ms)

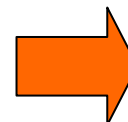


主要モード振幅の時間変化



低 放射強度 高

磁気島と可視光ヘリカル構造の関係を調べる



軟X線カメラによる接線方向の二次元画像計測

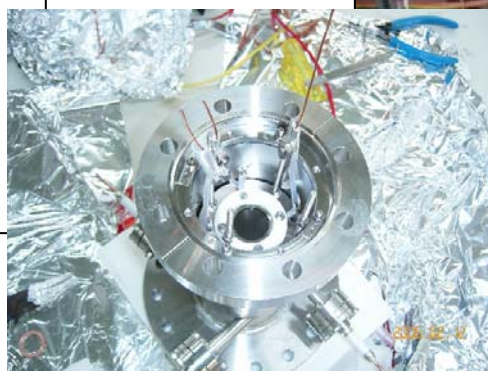
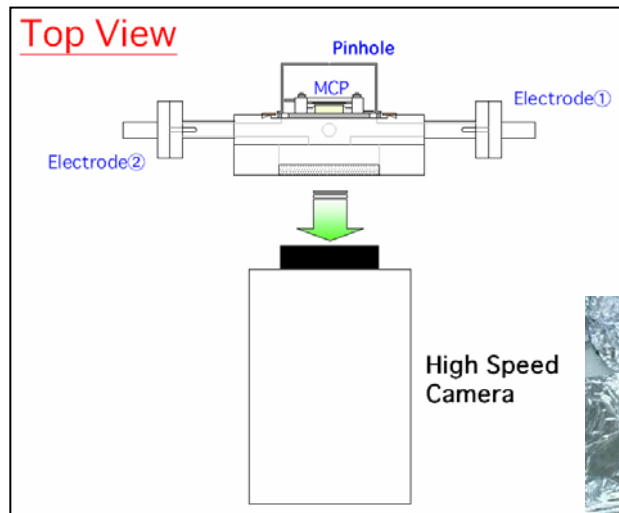
軟X線カメラの設計・製作

RFPプラズマの軟X線計測

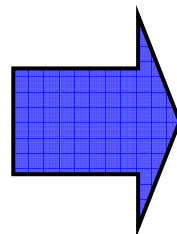
ピンホールカメラの原理で 二次元画像計測

- ・簡単な計測システム
- ・高空間分解能
- ・広い視野

- ・マイクロチャンネルプレート(MCP)
- ・蛍光板
- ・ICCDカメラ



軟X線カメラ



*1 Akio SANPEI et al., Plasma Fusion Res. 2, S1064 (2007).

*2 D. F. Escande, P. Martin, S. Ortolani et al., Phys. Rev. Lett. 85,1662(2000).

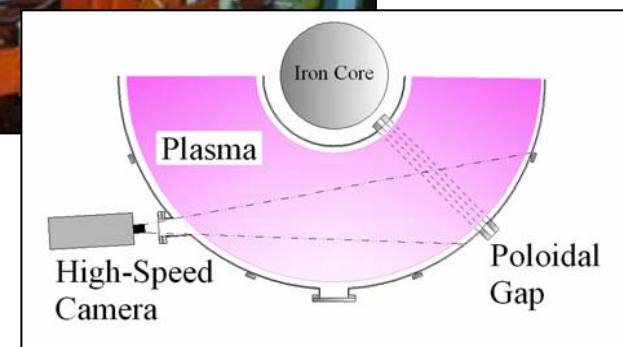
(シミュレーション結果)

磁気島の放射強度が軸上の50%程度あれば
軟X線カメラで十分に認識できる*1

(他のRFP装置における実験結果)

特定の磁気島が支配的になれば(QSH),
放射強度は他の領域よりの数倍~数十倍となる*2

磁気島構造の特定が可能



☆まとめ

- ・ 低アスペクト比RFP実験装置“RELAX”で高速カメラを用いた画像計測実験を行った
- ・ プラズマ内部に可視光のヘリカル構造を発見した
- ・ ヘリカル構造は主要な $m=1$ モードの有理面上に存在する

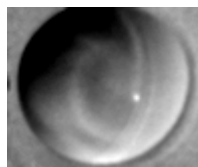
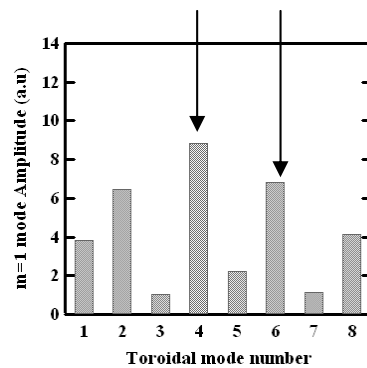
☆課題

- ・ 軟X線カメラの作成と計測
- ・ 可視光画像と軟X線画像の比較

高速カメラ画像と磁場モード - 回転するヘリカル構造 -

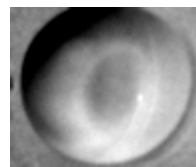
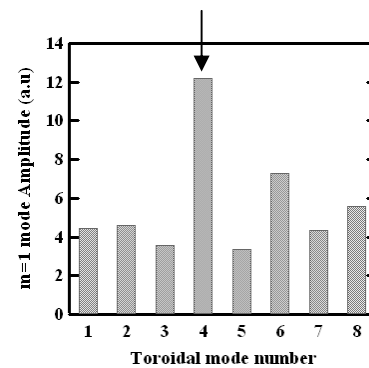
☆ ヘリカル構造 と m=1モードスペクトル

$m=1/n=4,6$
are dominant



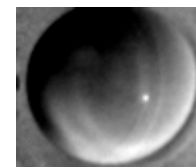
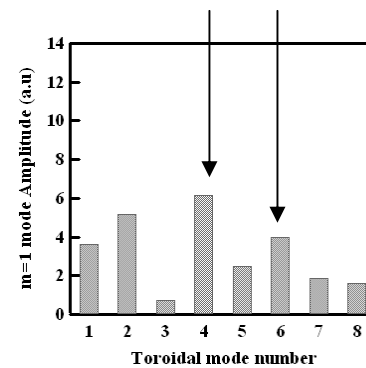
multiple
Helical tube

$m=1/n=4$
is dominant



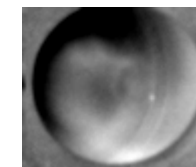
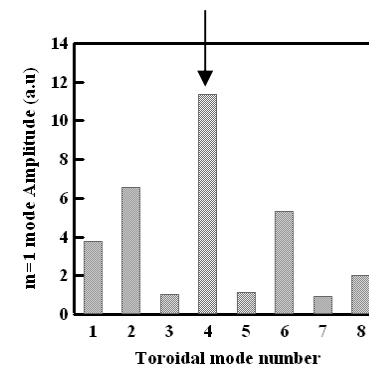
single
Helical tube

$m=1/n=4,6$
are dominant



multiple

$m=1/n=4$
is dominant



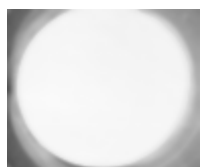
single

可視画像とm=1モードの関係

☆m=1モードの時間変化と高速カメラ画像の時間変化との関係

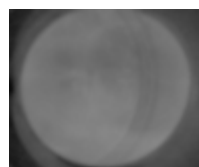
可視ヘリカル構造の出現

First Reaction



Strong H α

RFP configuration

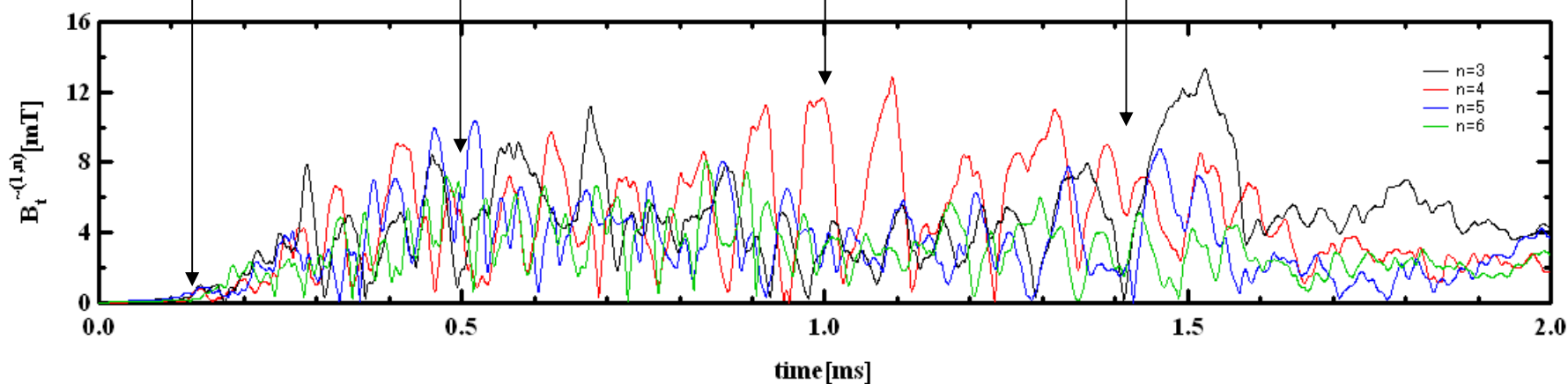
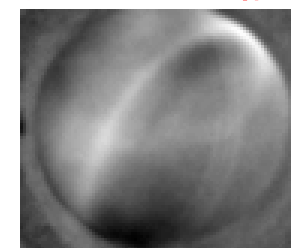


Dark light

ULQ configuration

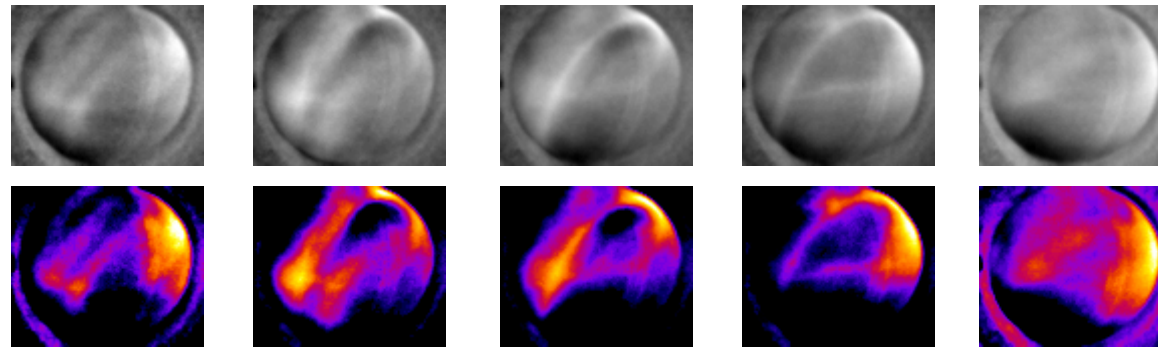


Brighter

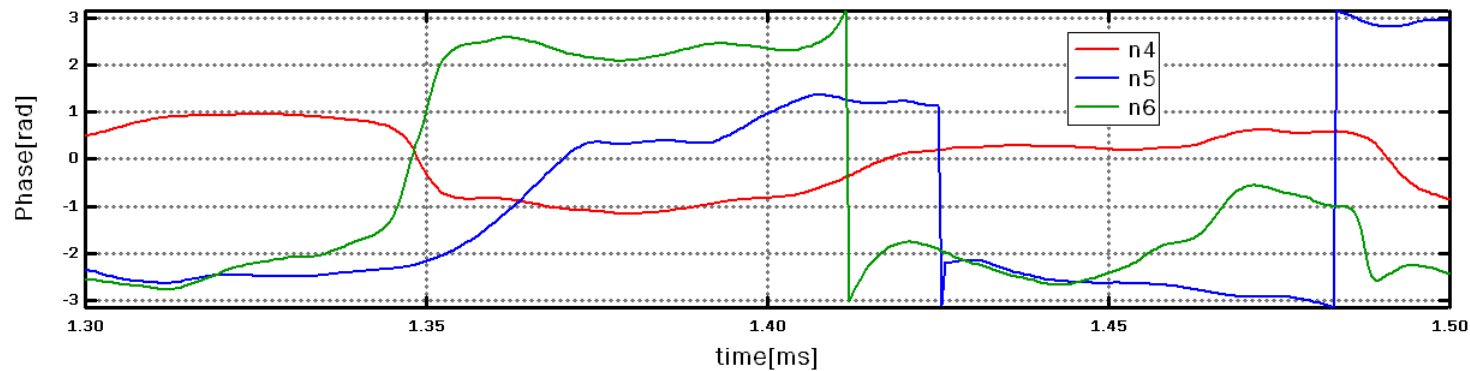


主なm=1モード振幅の時間変化

可視光ヘリカル構造の発見

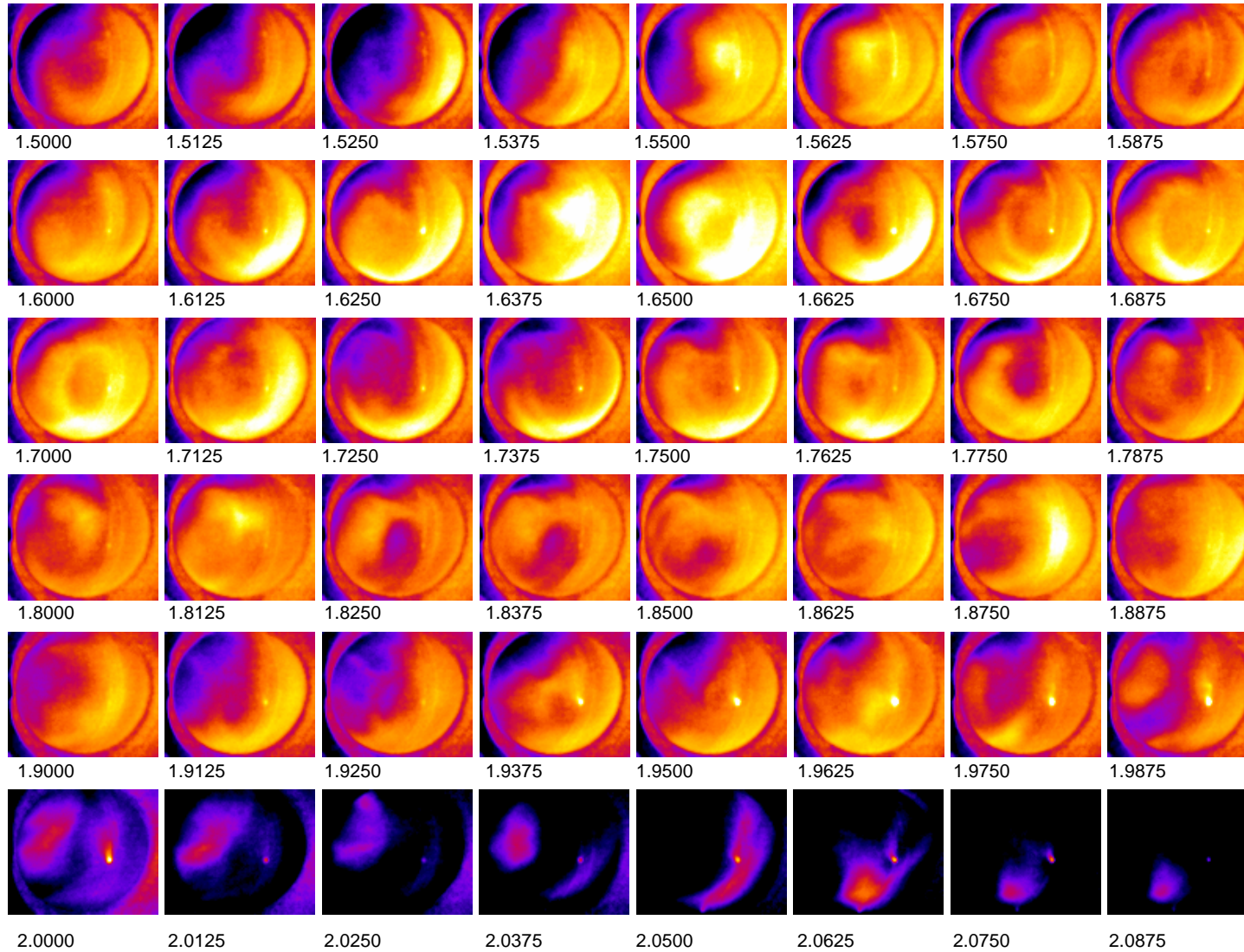


1.3875[μ s] 1.400[μ s] 1.4125[μ s] 1.425[μ s] 1.4375[μ s]

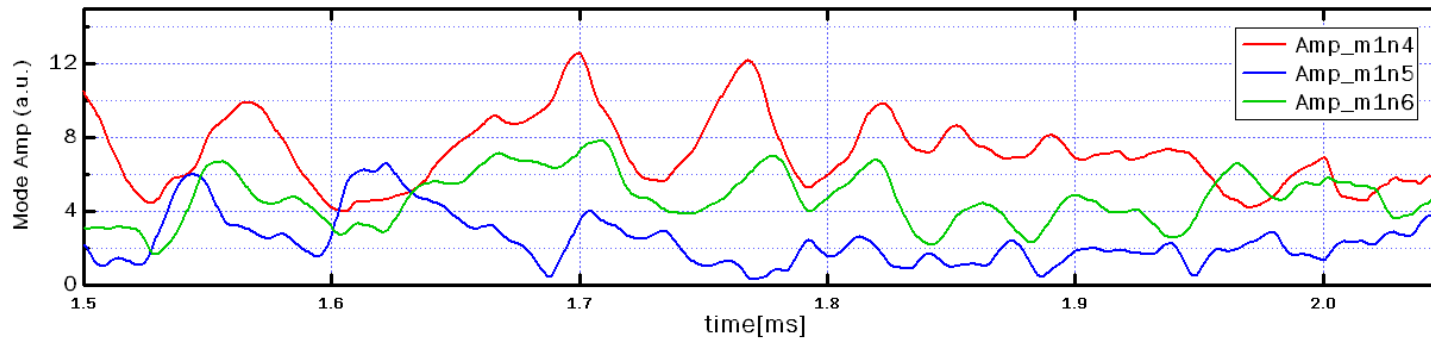


主要モード位相の時間変化

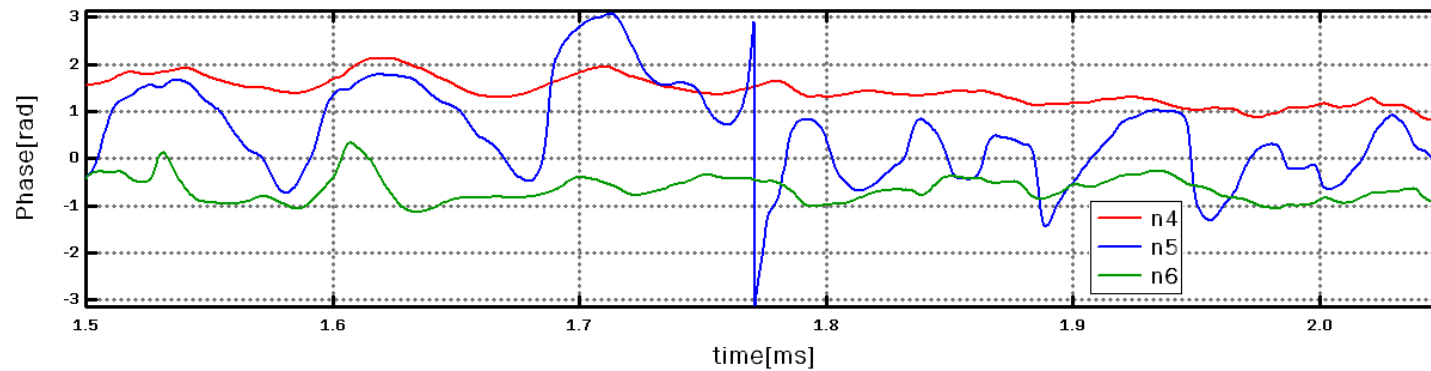
Appendix: 高速カメラ画像



Appendix: 主要m=1モードの振幅と位相



主要モード振幅の時間変化



主要モード位相の時間変化

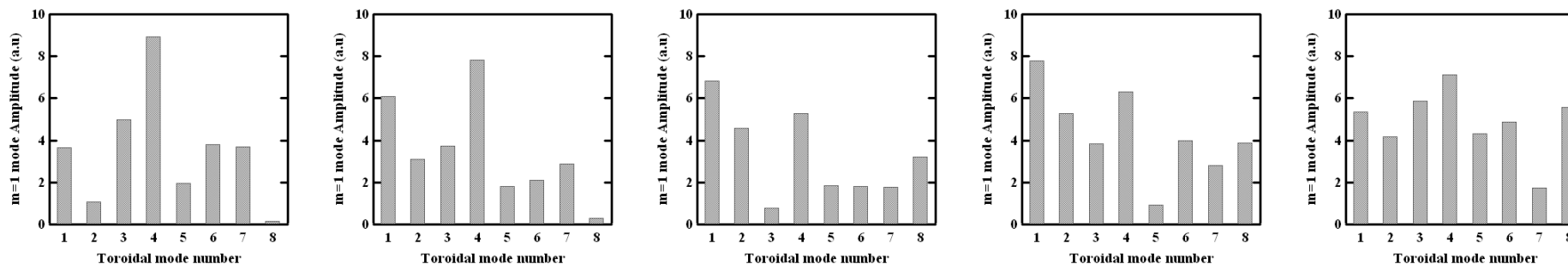
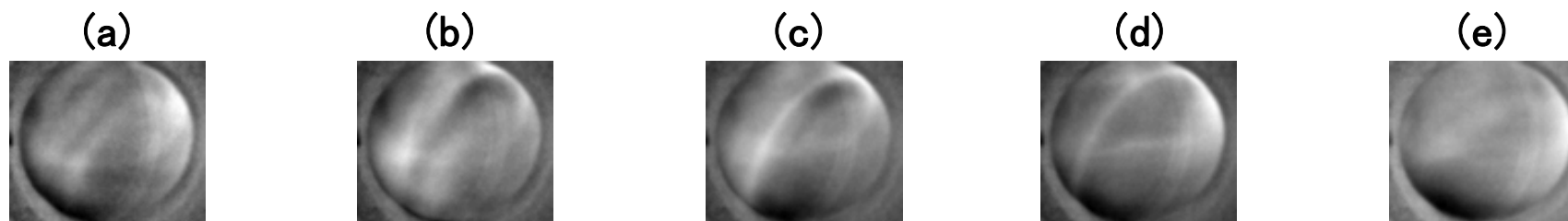
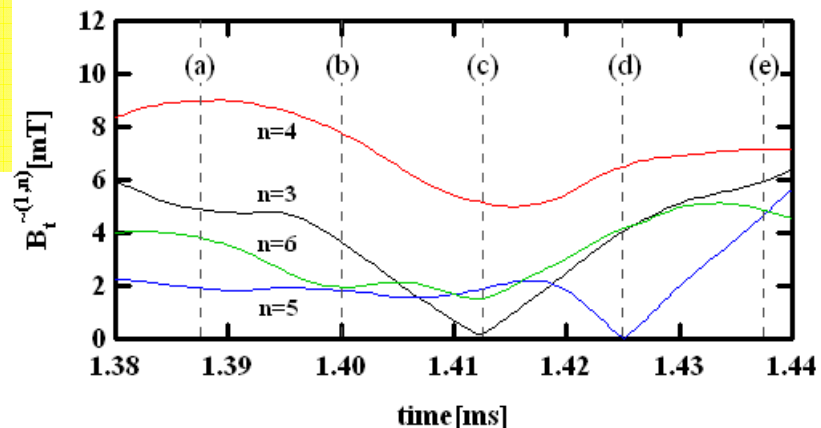
ヘリカル構造出現前後の高速カメラ画像と 磁場モード振幅の時間変化

☆瞬間的な(μ secオーダー)ヘリカル構造の形成と消滅

- $n=4$ モードが支配的.
- (c)の時点で $n=3$ モードが極小化する.
- (d)の時点で $n=5$ モードが極小化する.
- シンプルなヘリカル構造が現れるのは (c), (d).

シンプルな可視光ヘリカル構造は
数 μ secオーダーの瞬間的現象

ヘリカル構造の持続 \longleftrightarrow 磁場構造の単純化



トロイダルモードスペクトル