

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

Collapse, Terminating Eventsの物理
日本物理学会 シンポジウム
第52回年会 1997.3.29

(Received - Apr. 14, 1997)

NIFS-MEMO-24

July 1997

**RESEARCH REPORT
NIFS-MEMO Series**

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

Collapse, Terminating Eventsの物理

日本物理学会 シンポジウム

第52回年会 1997.3.29

Collapse, Terminating Events の物理

九州大学応用力学研究所

伊藤早苗

要約

プラズマの崩壊現象には、鋸歯状振動、ELM、高ベータ崩壊、など多種多様な現象が知られている。突発的に大規模なプラズマの変形や構造遷移が発生し、プラズマの时空構造の発展を特徴づける。プラズマ・パラメタの運転限界を決めたり、改善閉じ込め状態が消滅する機構になるなど、核融合研究にも重要な課題である。

多様性の一方で、普遍的な側面も最近明らかになってきた。即ち、

- (1) 崩壊をもたらすモードの成長率が急激にジャンプし不連続性があること (trigger 現象)
- (2) 崩壊発生直前までプラズマのパラメタに目立った差異が無く、崩壊が突発的に現われる、

という二点である。実験・理論の双方に活発な進展がみられ、旧来の方法論を飛び越えた新しい物理が探究されている。

研究の発展の気運を受けて、日本物理学会（年会、1997年）の機会にシンポジウムが企画された。ここにはシンポジウムに発表された最新の研究展開を収録する。今後の集中的研究と突破口への糸口になることを希望する。

Physics of Collapse and Terminating Events

Sanae-I. Itoh

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga 816

Abstract

Various catastrophic phenomena, including the sawtooth, ELMs, High- β collapse, etc., have been known in plasmas. The large scale deformation and transition take place abruptly, characterizing the the spatio-temporal evolution of the plasma structure. The collapse phenomena dictate the operational boundary or lead to the termination of the improved confinement states, and are the important subject for the fusion research as well.

While the observations on the variety have been accumulated, the understanding on the aspects, that unify the varieties of collapse and terminating events, has also shown progress: Namely,

- (1) The growth rate of the perturbation, that leads to the collapse, jumps suddenly and has a discontinuity (trigger phenomena), and
- (2) Noticeable change is not observed in measured parameters until just before the onset, and the abrupt crash happens.

Study has been actively advanced, in both the experiment and theory, and the new physics picture has been searched for.

Based on the recent reserach activities and progresses, the symposium was organized on occasion of the annual meeting of the Physical Society of Japan (March 29th, 1997, at Nagoya). Here, the new developement of the research, which has been presented at the meeting, is reported. This report would provide a basis for the future focused investigations and breakthrough.

keywords: collapse, terminating events, hysteresis, magnetic trigger, turbulence-turbulence transition

プログラム

1. はじめに
佐藤哲也
(核融合科学研究所)
2. Terminating eventsの物理の理論的アプローチ 伊藤早苗
(九州大学応用力学研究所)
3. ヘリオトロンにおける内部崩壊
関子秀樹
(京都大学エネルギー科学研究科)
4. JT-60Uの内部障壁の消滅
井手俊介
(日本原子力研究所)
5. TFTRにおけるHigh-beta collapse
長山好夫
(核融合科学研究所)
6. まとめと討論
伊藤公孝
(核融合科学研究所)

「Collapse, Terminating Eventsの物理」 シンポジウム

核融合科学研究所
佐藤哲也

”はじめに”

- 純非線形物理への挑戦
- 電気回路網理論や自動制御理論の先駆的研究：
例 サイラトロン（鋸歯状振動）
双安定回路、**push-pull**、引っ込み現象、
リミットサイクル、アトラクター、分岐現象
－これらは常微分の世界－
- プラズマの世界は空間構造と時間構造が一体となった
偏微分（自然）の世界。
－完全（純）非線形の世界－
- 「風吹けば（始点）・・・桶屋が儲かる（終点）」式の
直線的な単純（線形）思考ではなく、始点と終点の間には
無数の因果の糸が複雑なネットワークを組んでいると
いう認識に立つ複雑（非線形）思考の導入。

核融合プラズマ研究における基本姿勢の変遷

従来の姿勢

今後の姿勢

孤立系 →

開放系

平衡系 →

非平衡系

線形安定系 →

非線形発展系

プラズマ研究と純非線形物理

○核融合プラズマ研究は開放・非平衡・非線形系特有の現象、特に、自己組織化機能を積極的に利用しながら、点火条件達成への道を模索することをはじめている。（Hモードや内部障壁の発見）

○プラズマ研究は非平衡・非線形（即ち複雑性）物理の開拓への最も恵まれた環境にある。（大電力加熱核融合装置による実験）

○本シンポジウムはプラズマ研究が他の分野を先導して新しい物理学（純非線形物理学）を構築していく機が熟しはじめてきたとの認識の下に企画したものである。

トカマク等のトロイダルプラズマで観測される collapse 及び burst を伴う現象に理論的モデルからアプローチする。

これらの現象は、古くは、ディスラプティブ不安定性（もしくはその一部）として認識され、Sawtooth 時の crash や H モード時の Giant ELM として観測されたり、ごく最近では、high β_p モードや ERS (Enhanced Reversed Shear) モードと呼ばれる放電の Internal transport barrier の collapse などとして見出されている。現象としては、プラズマ放電の性能を劣化させたり、停止させたりする。（一見すると）全く異なった現象とも考えられるが、比較してみるとよく似た現象である。1) Onset に対して圧力勾配に閾値がある。2) 閾値は、high-n バルニングと呼ばれる MHD モードの不安定性限界に近い。3) 成長率が大きく、その変化率も大きい。

成長が速いことから MHD モードだと考えられ、多くの MHD に基づいた理論解析や実験解析がなされてきた。それらの多くは肯定的な報告であるが、実験解析と解析結果を比較すると重大な点で見落としがある場合が多い。つまり、MHD の線形解析で不安定性の成長率をプラズマの圧力分布の変化を考慮に入れながら、計算した場合に予言される成長率変化のタイム・スケールは 10 ms のオーダーであるが、上記のほとんどの現象は magnetic trigger と呼ばれる。100 μ s 以下の磁場揺動の速い成長が観測される。オーダーが違う速いタイム・スケールで成長している。物理として一般に、ある理論で予測されるタイム・スケールより速い現象は、その理論のフレーム・ワーク内では、扱えないのが常識である。しかも実験では、その成長率の時間変化に飛びが見られている。つまり、MHD 線形解析は適用できず、別の見方が必要となる。特に成長率の飛びが現れることは、例えば chaos の発生などに見られるような非線形な機構—分岐現象—が介在していることを示唆する。

ここでは「これらの現象は高温プラズマ中の新しい遷移現象である。」という理論的アプローチを取る。^{1,2)} そしてこれを「Mモード遷移」と呼ぶ。従来、我々は Lモード、Hモードの異常輸送は静電型のプラズマ（自己維持）乱流がもたらすものとして定式化し、提唱してきた。³⁾ “Mモード”とは、その異常輸送が電磁型乱流（高 β 領域の）による場合に対応する。このMモードの極限としては、静磁場がストキャスティックな状態（braided magnetic field）による輸送状態につながる。⁴⁾

Mモードにおける電子とイオンのそれぞれの輸送係数は、

$$\chi_e^M = \sqrt{m_i/m_e} M \chi_i^M, \quad \chi_i^M = \sqrt{m_i/m_e} M \chi_L; \quad \chi_L = \alpha^{3/2} (\delta/a)^2 / g$$

で与えられ、(χ_L は、Lモード時の係数、 $\alpha \equiv -q^2 R \beta'$) 係数 M は、揺動と粒子の相互相関時間の比によって決まる。現在のトロイダル・プラズマの典型的パラメータに対しては、 $M \sim \sqrt{\alpha \beta_i}$ (β_i : イオンベータ値) を与える。¹⁾ 圧力勾配パラメータ α が O(1) の場合 β_i が $(m_i/m_e)^{-1}$ 程度になるとこの効果が顕著になることがわかる。“Mモード”は圧力勾配上昇とともに微視的な乱流の磁場成分の作る揺動する磁気島が大きくなり重なりあうと発現する。この L/M 遷移（電場の効果を入れれば H/M 遷移となる）は α の値に閾値 α_c を持つ。また消滅は Mモードにおける磁気島の重なりが解ける条件であり、 α_c とは違った閾値 α_c^M となる。一般に $\alpha_c^M < \alpha_c$ であり得て、この場合には、図 1 に示すように flux-gradient の関係にヒステリシス特性を示す。（図 1 には H/M 遷移の例を示す。）遷移時間

は τ_{Ap} (ポロイダル・アルファベーン時間) のオーダーであり、 $100 \mu\text{s}$ 以下と予言する。またこのときに更に速い磁場揺動の増大を予言する。

プラズマ・エッジで H/M 遷移を起こすと輸送が急激に増大し、バースト現象として観測される。これが Giant ELM のモデルである。一方プラズマ中心付近でも L/M 遷移が起きる。この場合は crash や internal transport barrier collapse として観測されるだろう。図 2 に M モード遷移を起こす領域を $s-\alpha$ 面上 (s : shear) に示す。偶然にも線形 MHD 解析のバルーニング不安定性限界に近いところで起こる。 ω_{E1} は電場の効果を示すパラメーターである。プラズマ・コラムのあるどこかで、(ある s の値に対して) α の値が大きくなると遷移を起こし、バーストもしくは崩壊を起こす。バーストや崩壊 (erosion) 後 α が下がると逆遷移を起こしその閾値は、 $\alpha^M - q \sqrt{g/s}$ ($M \sim \sqrt{\alpha \beta_i}$ のとき) で s が大きいほど α に関してのヒステリシス幅が大きく顕著となる。

M モード遷移は“なだれ現象 (Avalanche)” を起こしうる。M モード遷移によって誘起された大きな流れは近隣の勾配を大きくし、遷移の連鎖と伝播を引き起こす。⁵⁾ 具体的なパラメーター依存性の詳細は、上記の各現象によって異なるが、本質的な点は変わらない。

それぞれの閾値を持った遷移と逆遷移は、与えられた加熱状態のもとで、サイクルを繰り返す。 α の閾値は入力パワーの閾値として見え、サイクルの周期はパワーに逆比例する。しかし、ある崩壊でプラズマ分布に対して加熱分布が平坦になり過ぎると、急峻な勾配を作れない状況になり、例えば急峻な勾配を内側に持つ改善閉じ込めモードに復帰できなくなる。巨視的振動のダイナミクスとの結合を考えると Sawtooth の崩壊現象等のモデルへ応用することもできる。⁶⁾

以上のような理論モデルをもとに events に現れる現象を考える。

- Ref 1) S.-I. Itoh et al, PRL 76 (1996) 920 and PPCF 38 (1996) 527.
 2) K. Itoh et al, PPCF 37 (1995) 707.
 3) K. Itoh et al, PPCF 36 (1994) 279.
 4) J. Krommes, J. Plasma Phys. 30 (1983) 11; A. B. Rechester and M. N. Rosenbluth, PRL 40 (1978) 38.
 5) 関連する発表 本物理学会, 28pYL12, T. Kubota et al.
 6) A. J. Lichtenberg et al, NF 32 (1992) 495.

図 1

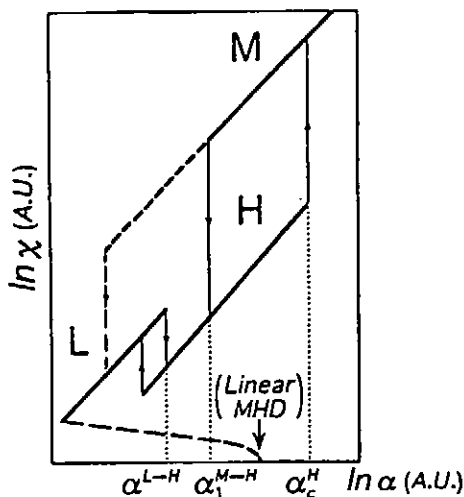
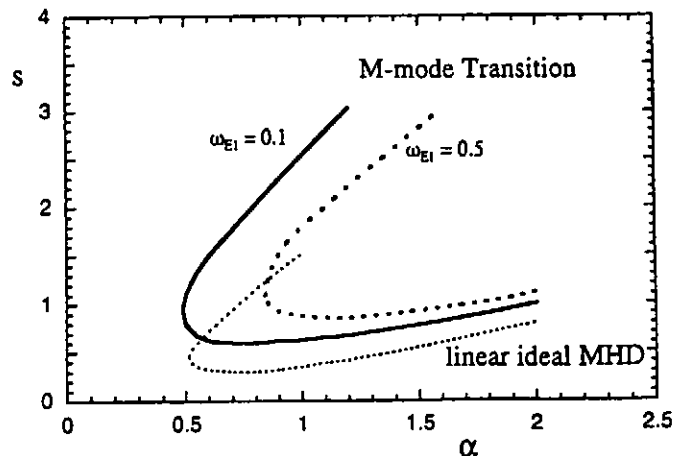


図 2



Terminating Eventsの物理の理論的アプローチ

九州大学応用力学研究所 伊藤早苗

高温プラズマの遷移現象としてとらえる新しい物理的描像

— 乱流の分岐理論による定式化 —

共同研究者：矢木雅敏、伊藤公孝、福山淳

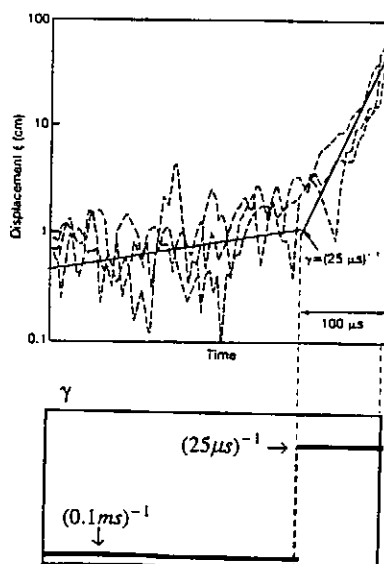
崩壊現象のいろいろ

- Sawtooth Crash (Internal, Partial)
- Disruption (Energy quench, whole)
- High- β Collapse (Internal)
- High p_e Crash (Internal collapse)
- Internal Barrier Collapse (Internal)
- X-Events (whole ?)
- MTE (Internal ?)
- Giant-ELMs (Edge)

トロイダル・プラズマの閉じ込め研究が始まって以来、いろいろな形や名称のもとで観測されている。

物理現象としてのミステリー

1. 速いタイムスケールを持つMagnetic Trigger



- Growth rate ($< 100\mu s$) の変化に飛び
↔ 非線形現象
- 短い Switching Time ($< 100\mu s$)
- グローバル・パラメーター変化はslow
[Ref. L/H 遷移]
速いタイムスケール存在

JET Team (Campbell)
IAEA-CN-53/A-VI-3 (1990)

2. 微小パラメータ変化とバースト性の発見

- ・間欠性ELMバースト(Intermittent)分岐現象の典型
(Hopf分岐ではない)

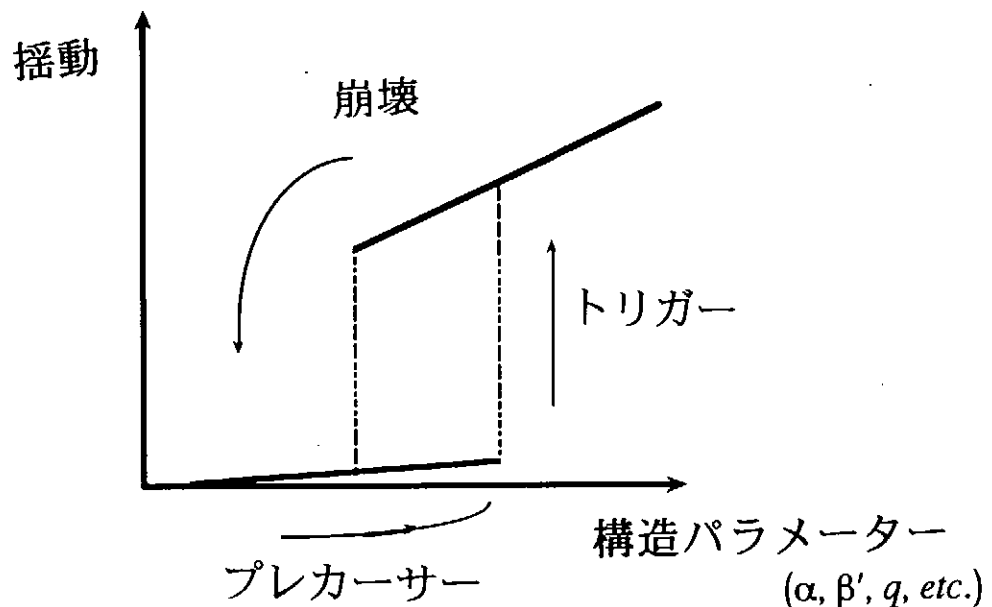
3. 発現パラメータ領域がMHD不安定領域 (β_c) に近い。タイム・スケールがAlfvenタイム

従来解釈の限界と新しい物理的描像

- トリガー、バーストの突発性：本質的に非線形現象
MHD不安定性の線形解析では不適當
抵抗性、電場の効果の導入と現実

- プラズマは遷移現象を示す(L/H遷移)
電磁流体：誘電性、磁性
乱流—乱流遷移：L/H、L/M

勾配(力)–揺動(流れ)関係のヒステリシス



モデル方程式

運動方程式

$$\frac{d}{dt} \nabla_{\perp}^2 \phi = \frac{B_0^2}{m_i n_0 c^2} \nabla_{\parallel} J_{\parallel} + \frac{B_0}{m_i n_0 c} \hat{z} \cdot \nabla P \times \nabla \frac{2r \cos \theta}{R_0} \quad (1) \quad \mu$$

$$\frac{\partial}{\partial t} u = -\mu_c \nabla^2 u + \frac{g}{\rho} \nabla P \quad \text{ナービエ・ストークス}$$

オーム則

$$\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla_{\parallel} \phi = -\eta_{\parallel} J_{\parallel} - \frac{m_e}{n_0 e^2} \frac{d}{dt} J_{\parallel} \quad (2) \quad \mu_e(\lambda)$$

圧力方程式 $\frac{dP}{dt} = 0 \quad (3) \quad \chi$

$$\frac{d}{dt} f = \frac{\partial}{\partial r} f + [c\phi / B_0, f], J_{\parallel} = -(c/4\pi) \nabla_{\perp}^2 A$$

自己維持型プラズマ乱流の基礎方程式 (バルーニングモード)

$$\frac{d}{d\eta} \frac{F}{\hat{\gamma} + \Lambda F^2} \frac{d}{d\eta} \left(\hat{\gamma} + KF + \omega_{E1} \frac{d}{d\eta} \right) \tilde{p} + \alpha [\kappa + \cos \eta + (s\eta - \alpha \sin \eta) \sin \eta] \tilde{p} - \left(\hat{\gamma} + MF + \omega_{E1} \frac{d}{d\eta} \right) F \left(\hat{\gamma} + KF + \omega_{E1} \frac{d}{d\eta} \right) \tilde{p} = 0$$

$\alpha = -q^2 R \beta'$, $s = r q' / q$, q : 安全係数, R : 主半径, $\omega_{E1} = E_r' \tau_{Ap} / B$, $\beta = 2\mu_0 p / B^2$,

δ : 表皮長.

γ : 成長率, n : トロイダルモード数, \tilde{p} : 圧力揺動

η : バルーニング座標, $F = 1 + (s\eta - \alpha \sin \eta)^2$, $K = \hat{\chi} n^2 q^2$, $M = \hat{\mu} n^2 q^2$, $\Lambda = \hat{\lambda} n^4 q^4$,

χ, μ, λ : 熱輸送係数, 粘性率, 電流拡散係数,

規格化 $\hat{\gamma} = \gamma \tau_{Ap}$, $\hat{\mu} = \mu \tau_{Ap} a^{-2}$, $\hat{\chi} = \chi \tau_{Ap} a^{-2}$, $\hat{\lambda} = (\delta / a)^2 \hat{\mu}_e$

非線型相互作用は輸送係数として繰り込まれている。

自己維持乱流のプランチ

L、H-モード

輸送係数

$$\chi_H = \frac{\chi_L}{1 + G(s, \alpha)\omega_{E1}^2}, \quad \chi_L = \frac{\alpha^{3/2}}{g(s, \alpha)} \frac{\delta^2}{\tau_{Ap}} \quad \chi_e / \mu_e \sim \chi_i / \mu_i \sim 1, \quad \chi_e \approx \chi_i$$

揺動振幅

$$\hat{\phi}_{H,L} = \hat{\chi}_{H,L} = \frac{\alpha^{3/2}}{(1 + G\omega_{E1}^2)} \frac{1}{g} \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \quad \hat{B}_r = \left(\frac{k_\theta}{k_\perp}\right)^4 \frac{s}{\hat{k}_r \hat{k}_\theta^2} \left(\frac{a}{\delta}\right)^2 \frac{\hat{\phi}}{\hat{\chi}}$$

$$\hat{\phi} = \tilde{\phi} / (\epsilon a v_A B_0), \quad \hat{B}_r = \tilde{B}_r / \epsilon B_0, \quad \hat{k}_{\theta,r} = a k_{\theta,r}$$

典型的モード数

$$\hat{k}_\theta = (g \cdot (1 + G\omega_{E1}^2) \alpha^{-1})^{1/2} a / \delta \quad k_r = \frac{s}{\sqrt{g}} (1 + G\omega_{E1}^2)^{1/4} k_\theta \quad \left(\frac{k_\perp}{k_\theta}\right)^2 = 1 + \frac{s^2}{g(s, \alpha)} \sqrt{1 + G\omega_{E1}^2}$$

M_L-モード, M_H-モード

輸送係数

$$\hat{\chi}_e^M = \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} M \hat{\chi}_i^M, \quad \hat{\chi}_i^{M_{H,L}} = \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} M \hat{\chi}_{(L,H)}^M \quad \chi_e \sim \mu_e \gg \chi_i \sim \mu_i$$

M (0 < M < 1) 実効的ストキャスティシティを示す.

揺動振幅

$$\hat{\chi}_e^M = \frac{v_{te}}{v_{Ap}} \frac{\epsilon}{\hat{k}_r} M \hat{B}_r, \quad \hat{B}_r^{M_H} = (v_{Ap} / \epsilon v_{te}) \hat{k}_r M^{-1} \hat{\chi}^{M_H}$$

典型的モード数

$$\left(\hat{k}_\theta^{M_H}\right)^{-1} = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{g(s, a)(1 + G\omega_{E1}^2)}} \left(\frac{m_i}{m_e} M^2\right)^{1/4} \frac{\delta}{a} \quad k_r^{M_H} = \left(k_r^{M_H}\right)^{-1} \frac{1}{-s} \left(\frac{m_i}{m_e} M^2\right)^{1/4} \frac{\sqrt{\alpha}}{(1 + G\omega_{E1}^2)^{3/4}} \delta$$

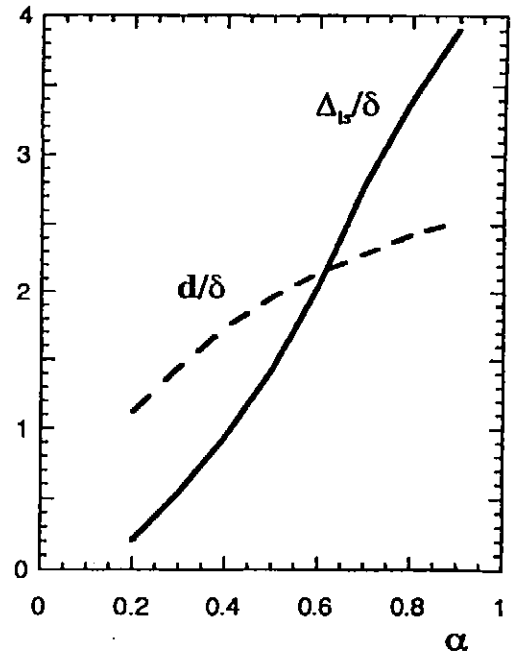
分岐条件 (L-(H) からM-モードへの遷移)

Chirikov 判定条件

$$\hat{\Delta}_{is} = \hat{d}/2,$$

Transport Catastrophe の起こる条件

$$\alpha > \frac{\sqrt{g}}{2} (1 + G\omega_{E1}^2)^{5/4} (1 + s^2 g^{-1} \sqrt{1 + G\omega_{E1}^2})^2 \equiv \alpha_c^H$$



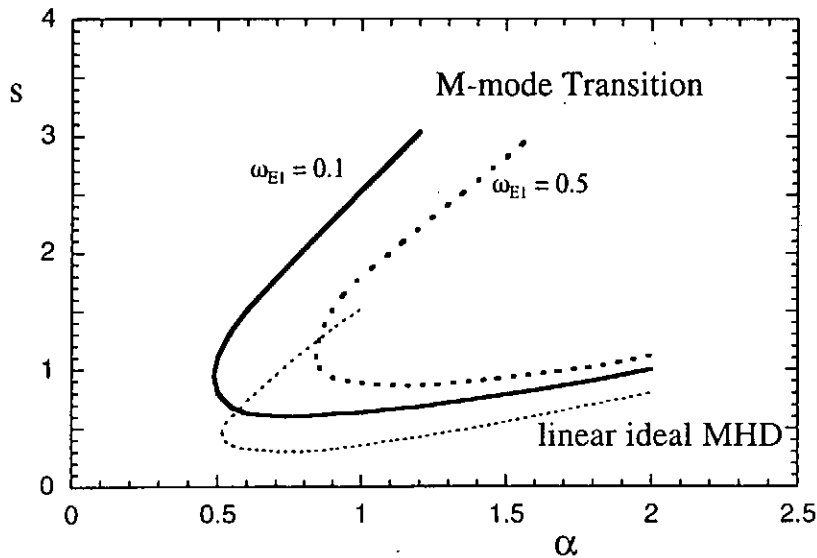
固有値方程式の数値解より評価する

$$\hat{B}_r = s k_\theta^2 k_r^{-1} k_\perp^{-4} (a/\delta)^2, \quad k_r^2 = n^2 q^2 \int_{-\infty}^{\infty} (s\eta - \alpha \sin\eta)^2 \hat{\rho}(\eta)^2 d\eta \left(\int_{-\infty}^{\infty} \hat{\rho}(\eta)^2 d\eta \right)^{-1}$$

(s=1.5, e=1/8, q=3, d/a=10⁻², w_{E1}=0.12).

Mモードの発現領域

(s-α ダイアグラム上)



なだれ現象

カタストロフィーの始点 : $r = r_{ch}$

半径方向の相関長 : ℓ_r^M

カタストロフィーに伴って分布が変化する時間

$$\tau_c^M = (\ell_r^M)^2 / \chi_c^M$$

急峻な勾配が次々に生まれる

$$r = r_{ch} \pm \ell_r^M$$

輸送カタストロフィーの伝播速度

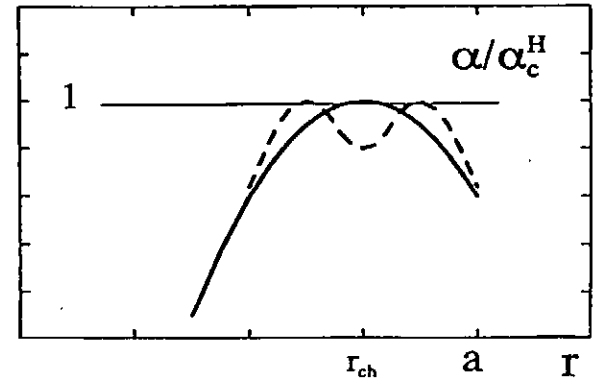
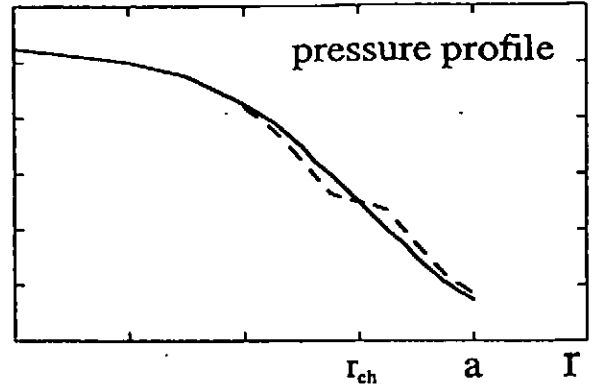
$$V_{AVA} = \ell_r^M / \tau_c^M$$

ピボット点 : r_{ch} の近傍

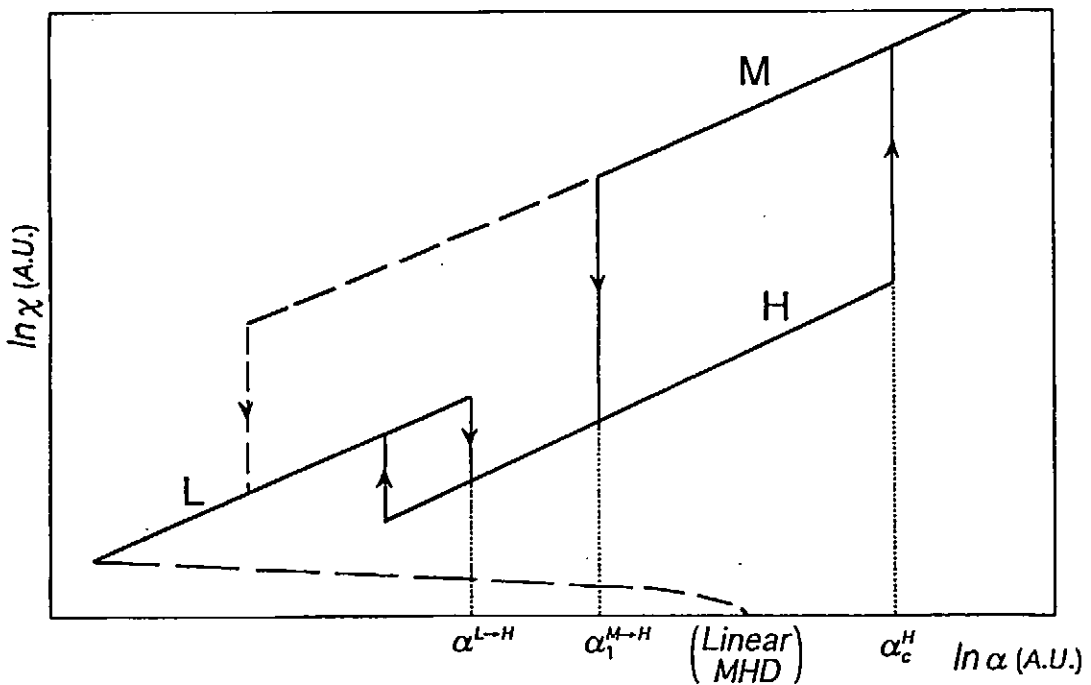
なだれの時間 : $\tau_{AVA} = (r_{ch} - r_p) \tau_c^M / \ell_r^M$,

$$\tau_{AVA} = \frac{\tau_{AVA}}{\tau_{AP}} = \left(\frac{m_i}{m_e} M^2 \right)^{-3/4} \frac{(r_{ch} - r_p) g (1 + G \omega_{Bi}^2)^{1/4}}{\delta s} \frac{1}{\alpha}$$

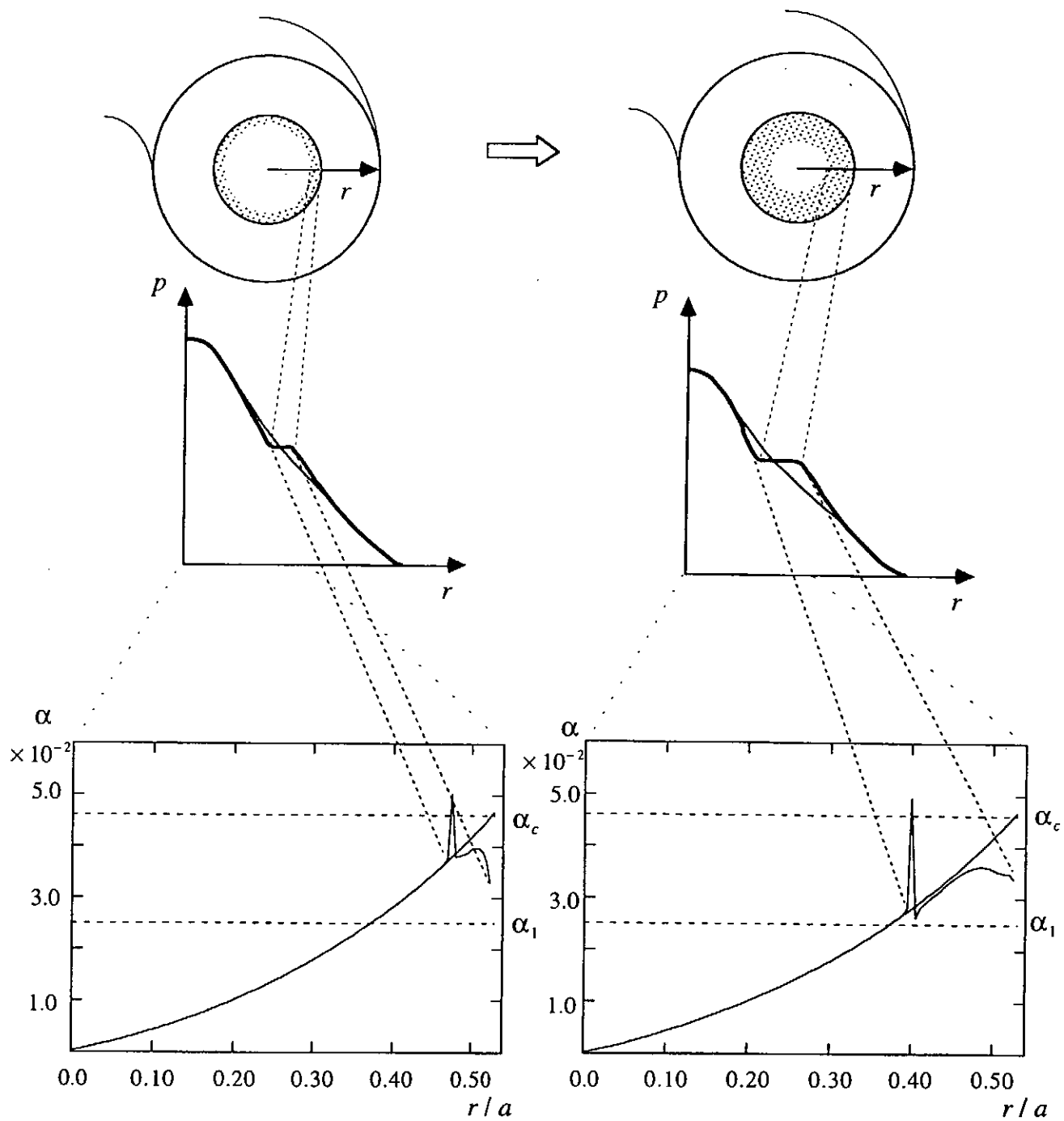
$$\frac{\tau_{AVA}}{\tau_{diff}^L} = \frac{\delta}{(r_{ch} - r_p)} \left(\frac{m_i}{m_e} M^2 \right)^{-3/4} \frac{g^{1/4}}{s} \left(1 + \frac{s^2}{B} \right), \quad \tau_{diff}^L = (r_{ch} - r_p)^2 / \chi_c^L$$



勾配 (力) と流れの関係と分岐



雪崩現象（遷移フロントの伝播）



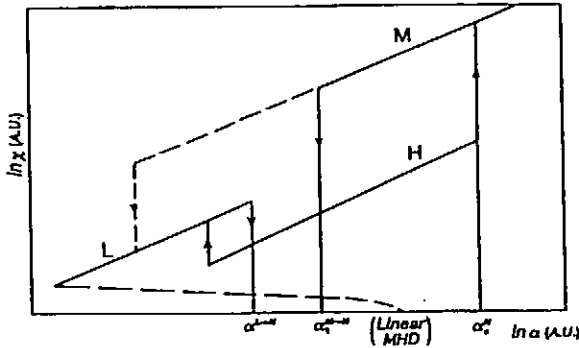
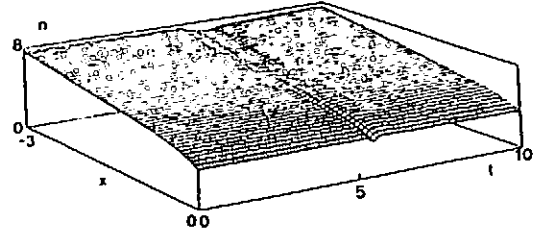
久保田 他：本学会 28pYL12

ELM バーストとそのダイナミクス

H-mode, M-H 遷移,
M-mode と H-mode への逆遷移のサイクル
バースト状の大きなパワー・ロスを作る

トリガー : H から M モードへの分岐の際に
乱流が非線形成長する,

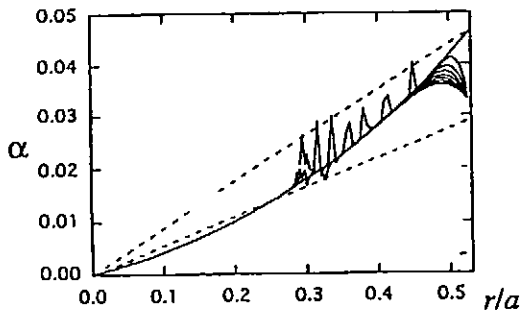
$$\tau_{gr} \sim s^{1/3} g^{1/6} \left(1 + \frac{s^2}{g}\right)^{-1/3} \alpha^{-1/2}$$



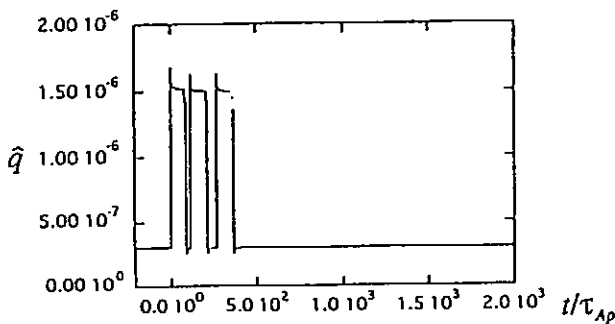
S.-I. Itoh et al, NF 33 (1993) 1445.

遷移フロントの伝播 (なだれ現象とバーストの発現)

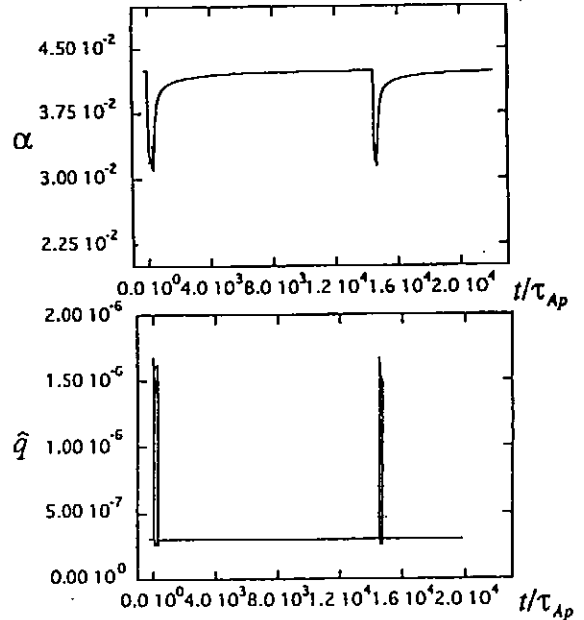
T. Kubota et al : 久保田他 当学会 28pYL12



遷移界面の伝播



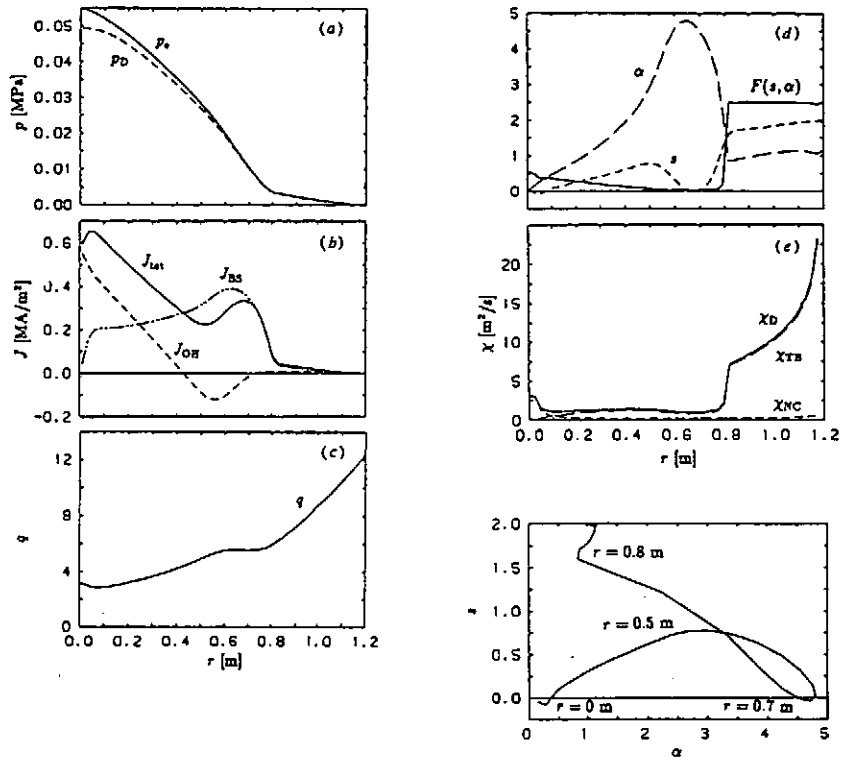
誘起される flux



$$\int \hat{q} dt / \tau_{Ap} = 5.16 \times 10^{-3}$$

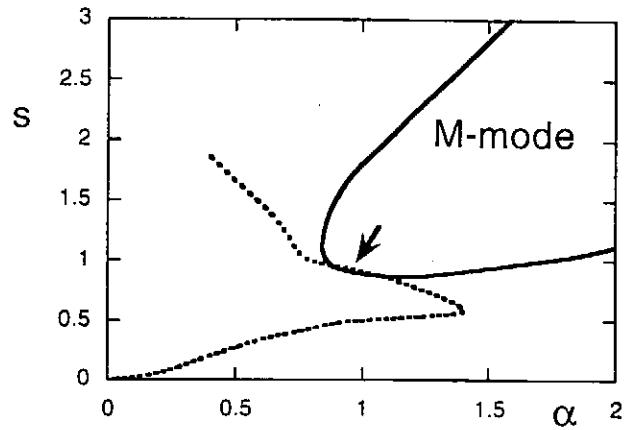
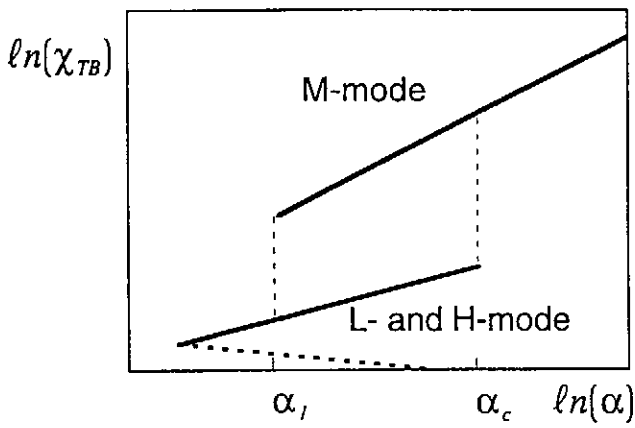
長時間発展 : 1 サイクル

内部障壁の形成シミュレーション



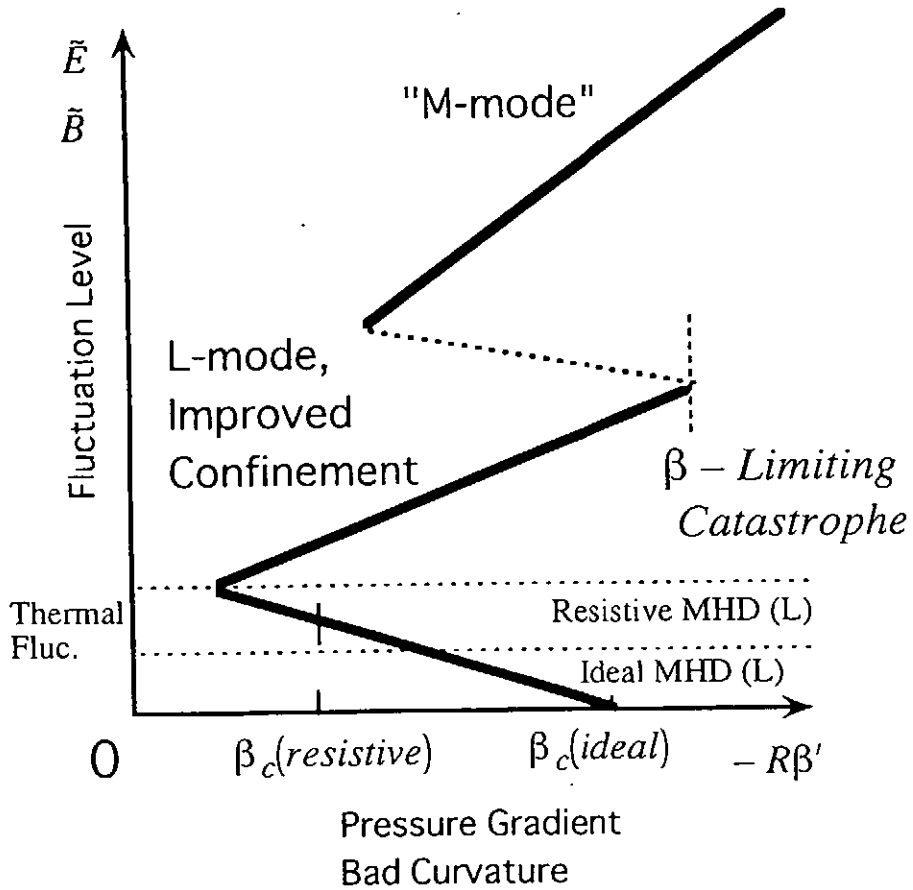
Fukuyama et al. PPCF 37 (1995) 611.

内部障壁の崩壊モデルと s- α ダイアグラム

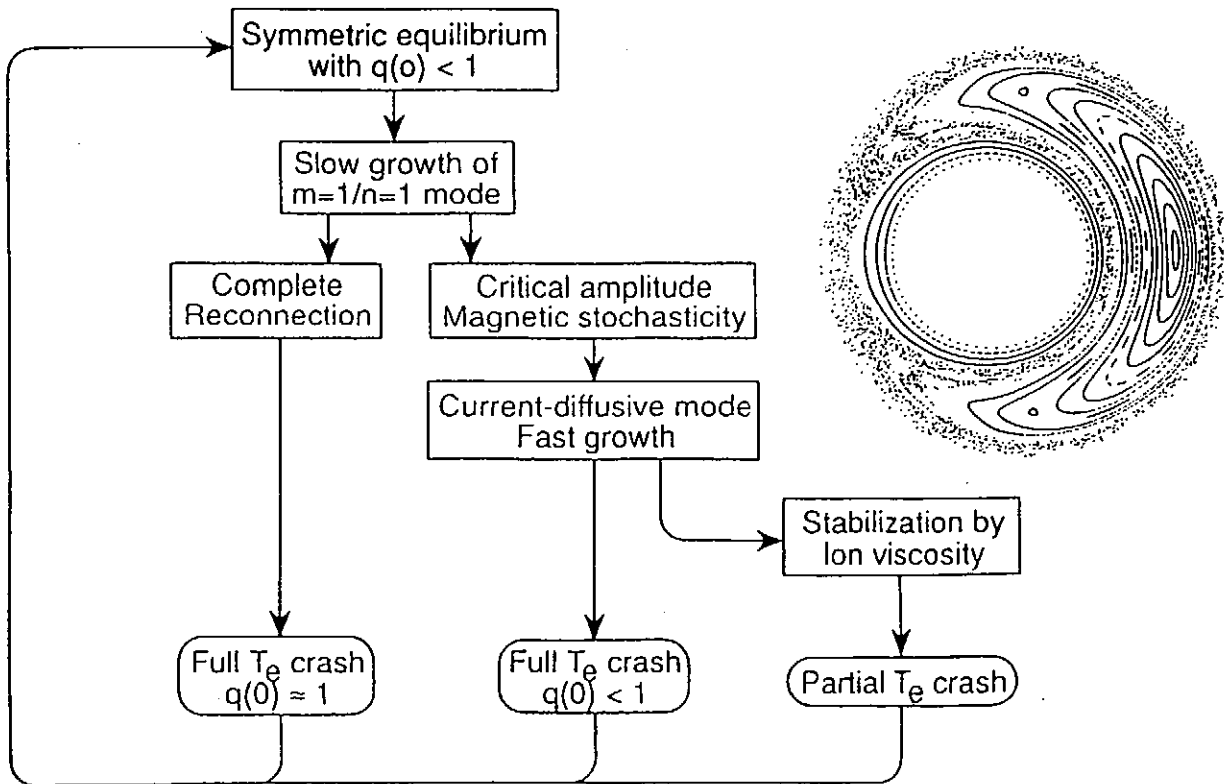


Transport Simulation Fukuyama et al.

揺動のヒステリシス特性



SAWTOOTH OSCILLATIONS



まとめ

1. Collapse, Terminating Eventsを

「プラズマの非線形分岐現象(M-モード遷移)」
 としてとらえる新しい物理的現象を提示。

2. M-モード遷移とは

L/Hモード (静電) → Magnetic Braiding モード (電磁)
 速いタイム・スケールと成長率の不連続性
 バースト現象とヒステリシス特性
 遷移界面の伝播となだれ現象
 発現領域：(理想型MHDバルーニングモードに近接)
 (Current-Diffusive-Ballooning Modeの電磁乱流)

3. Giant ELMs, Sawtooth Crash, Internal Collapse, High-β Collapse . . .

などの中の通有の物理

種類	主たる崩壊 量・条件	Explosive $\Upsilon^{1/2} / t_{sw}$	Growth モード	Precursor モード・タイム	Mag. mode の役割	ヒステ リシス	Physics モデル
Sawtooth Crash	$p: \alpha, \beta$ not clear	$< 100\mu s$ $< 100\mu s$	1 / 1	1 / 1 slow	may not	Y'	m=1 resonant/ interchange/kink Micro/Macro Stochasticity (M-mode Transition)
Disruption (energy quench)	$p: \alpha, \beta$ $q(0) > 1,$ $q(a)=2, 3$	$< 100\mu s$ $< 100\mu s$	1 / 1	2 / 1 slow 3 / 1	may/may not	Y'	2/1+3/1 island overlapping 1/1+2/1 Global Stochasticity
High-β Collpase	$p: \alpha, \beta$	$< 100\mu s$ $< 100\mu s$	high-n $n = 12$	1 / 1 slow 4 / 3 moderate	Global → Micro	Y	m=1モード→高n-Bモード M-mode Transition
High- p_e ' Crash	p_e' $p_e' = p_{e,c}$	$< 100\mu s$ $< 100\mu s$	2 / 1	2 / 1 slow moderate	Not Clear	Y	m=2 Global Stochasticity M-mode Transition
Internal Barrier Crash	$p: \alpha, \beta$ 有理面 = ITB	$< 100\mu s$ $< 100\mu s$	3 / 1, 4 / 1	N. I.	Not Clear	Y'	n=1 Infernal mode ? M-mode Transition
X-Events	$p: \alpha, \beta$	$< 100\mu s$	N. I.	N. I.	Not Clear	Y'	
MTE	$p: \alpha, \beta$ $(dV_\phi / dr)_c ?$	$< 100\mu s$ $< 100\mu s$	high-n	N. I.	Not Clear	Y''	
Giant ELMs	$p: \alpha, \beta$ $\alpha = \alpha_c = s / 2$	$< 100\mu s$ $< 100\mu s$	high-n med.-n	N. I.	Mag. Fluc. SOL	Y	High-n Ballooning mode Surface Kink, M-mode Transition

京大工ネ科 関子秀樹、細坪護孝

Internal Disruption in Heliotron E

Graduate School of Energy Science

H. Zushi, M. Hosotsubo

1] はじめに

無電流放電の可能なヘリカル装置においても、磁気丘の存在のため内部崩壊現象が起きる[1]。この内部崩壊は、低次のモード数($m = 1, 2, 3$)をもつ交換型不安定性の非線形発展により駆動される[2]と考えられてきた。

磁気軸を含む全領域が、磁気丘となる配位を選び、中心部の弱いシア安定化効果に打ち勝つ圧力項の成長で、 $m = 2 / n = 1$ 不安定性が $q = 2$ 有理面近傍で内部崩壊を引き起こす過程を、臨界圧力勾配の存在、モード成長時の勾配(駆動項)と成長率の関係について調べた。内部崩壊の後にしばしば、ポストカーサーと呼ばれる周期振動が観測される。軟 X 線の分布は内部崩壊後ホローになっており、ポストカーサーは初期分布がホローの状態でも駆動される。即ち内部崩壊では、 $-\nabla \epsilon_{sx}|_{core} > 0$ であるがポストカーサーでは初期には $-\nabla \epsilon_{sx}|_{core} < 0$ でも駆動される。(類似な軟 X 線のホロー分布は ECRH 単独プラズマにおいて典型的に観測されるものであり、こうしたプラズマでも一般に抵抗値の増加によって鋸歯状振動が起こる。)本研究ではこの周期振動過程においても駆動項と振動モード成長の関係を調べた。

80~120 ch の軟 X 線検出器を用いて測定した結果をポロイダルモード数 $m \leq 3$ 、径方向モード数 7-9 のフーリエベッセル級数展開法を用いたトモグラフィ解析を行い、圧力勾配は $m = 0$ 成分から決定した。信号のサンプル時間は $3 \mu s$ である。

2] 内部崩壊

ビーム入射プラズマにおいては、この磁気丘配位では ほぼ $\beta(0) > 0.4\%$ で内部崩壊が生じる(図 1)。内部崩壊は軟 X 線分布を中心ピーク型からホロー分布に変えるが、電子密度分布はホローにはならない。又、電子温度分布はもともと平坦であり通常その変化はほとんど観測されない。その意味で軟 X 線分布の変化は、不純物分布、の変化を表していると考えられている。崩壊前後の揺らぎ $\epsilon_{m=2}(r \approx r_{q=2})$ の成長と $q = 2$ 有理面近傍の圧力勾配 $\nabla \epsilon_{m=0}(r \approx r_{q=2})$ の時間発展の相互関係を示したのが図 2 である。密度と ECE から推定した電子圧力の変化は軟 X 線計測結果に比べて崩壊直前にはさらに微かな時間変化しか示さない。従って、 ∇P がある臨界値 ∇P_c を越えた時にモードが不安定になるというよりは、突然(おそらくは $\nabla P \approx \nabla P_c$ の実験条件が満たされているのであろうが)モードが爆発的に成長するといった描像が我々の結果から導かれる。線形理論の描像では成長率は線形駆動力に比例するため ∇P がモードの成長によって低下すると成長率は低下する。しかし、実験結果はこの点に関してはむしろ、駆動力の低下の過程においてさえモードの成長率や振幅のさらなる増大があり得る事を示した[3]。

3] ポストカーサー

内部崩壊後のポストカーサーは、内部崩壊を経てもなお生き残った磁気島とプラズマの回転で説明されてきた。我々の場合計測コードの制約のためトモグラフィ解析の不明瞭さはあるもの

の、回転するモードとして説明できる場合に加えて全く回転していないが周期振動を示す場合が観測された(図3)。後者の場合ホロー分布から緩やかに分布が急峻化すると、突然 $m=0$ モードの振幅が増大し、中心部の X 線強度が増し(即ち不純物が中心に集積し)、 $\nabla\epsilon(r \approx r_{q=2}) \approx \nabla\epsilon_{crit}$ に達すると $m=2$ モードが急激に増加し、そのため中心部に蓄積した不純物粒子が $q=2$ の外部に掃き出される。この過程がきわめて周期的に繰り返され、ポストカーサー振動と見える訳である。図2と同様に、駆動項と $m=2$ モードの振幅を調べると図4の様になり、内部崩壊と同様な描像が成立している様に思われる。したがってこの周期振動はプラズマ中心部で内向きピンチと小規模の崩壊が繰り返す事により生じていると考えられる。

4) まとめ

内部崩壊やポストカーサー振動において、不安定性の成長過程とその駆動力との対応関係に注目して実験を整理した。分布の変化から求めた輸送係数の評価や、ECRH プラズマで観測されるホロー分布で起きる鋸歯状振動についても報告する予定である。

5) 参考文献

- [1] J.Harris et al. PRL **53** 2242(1984)
- [2] M.Wakatani, et al., NF. **24** 1407(1984)
- [3] H.Zushi, et al., 16th IAEA(1996)

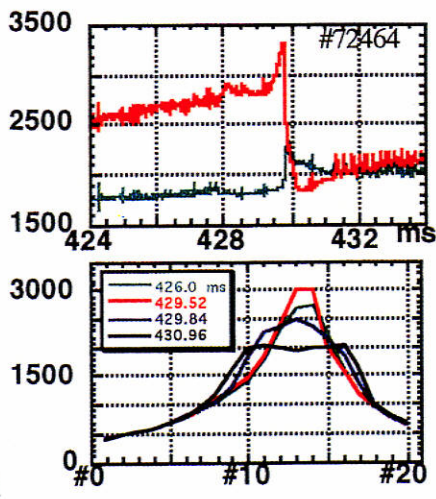


図 1

図 1 典型的な内部崩壊の様子の時間発展とある断面の積分信号値から求めた X 線分布の変化

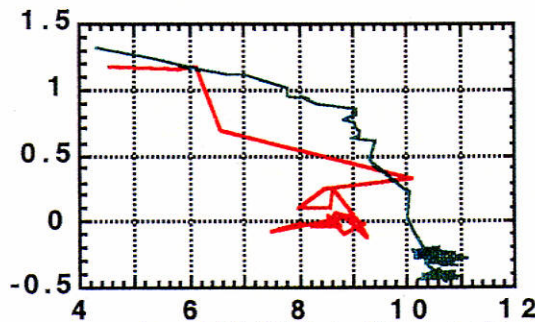


図 2 $m=2$ モードの対数振幅 (Y 軸) と勾配 (X 軸) を典型的な二つの放電に対してプロットしている。

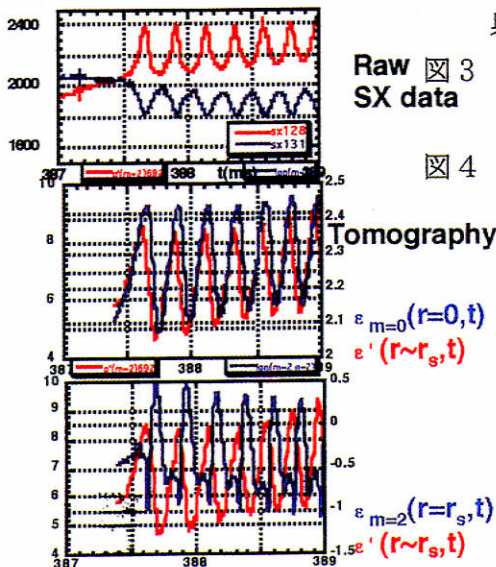


図 3

図 3 post-cursor の X 線の生 data, $m=0, m=2$ mode の振幅と勾配の時間発展をそれぞれ示している。

図 4 post-cursor 振動の初期、20ms 後に於ける $m=2$ モードの対数振幅と勾配の関係を示したもの。

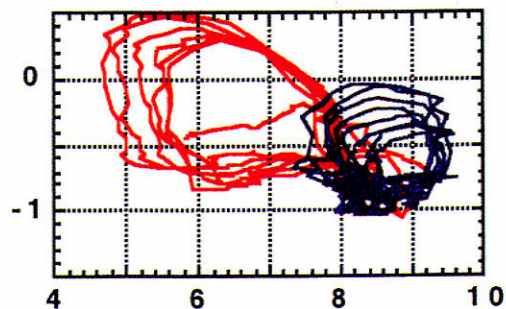
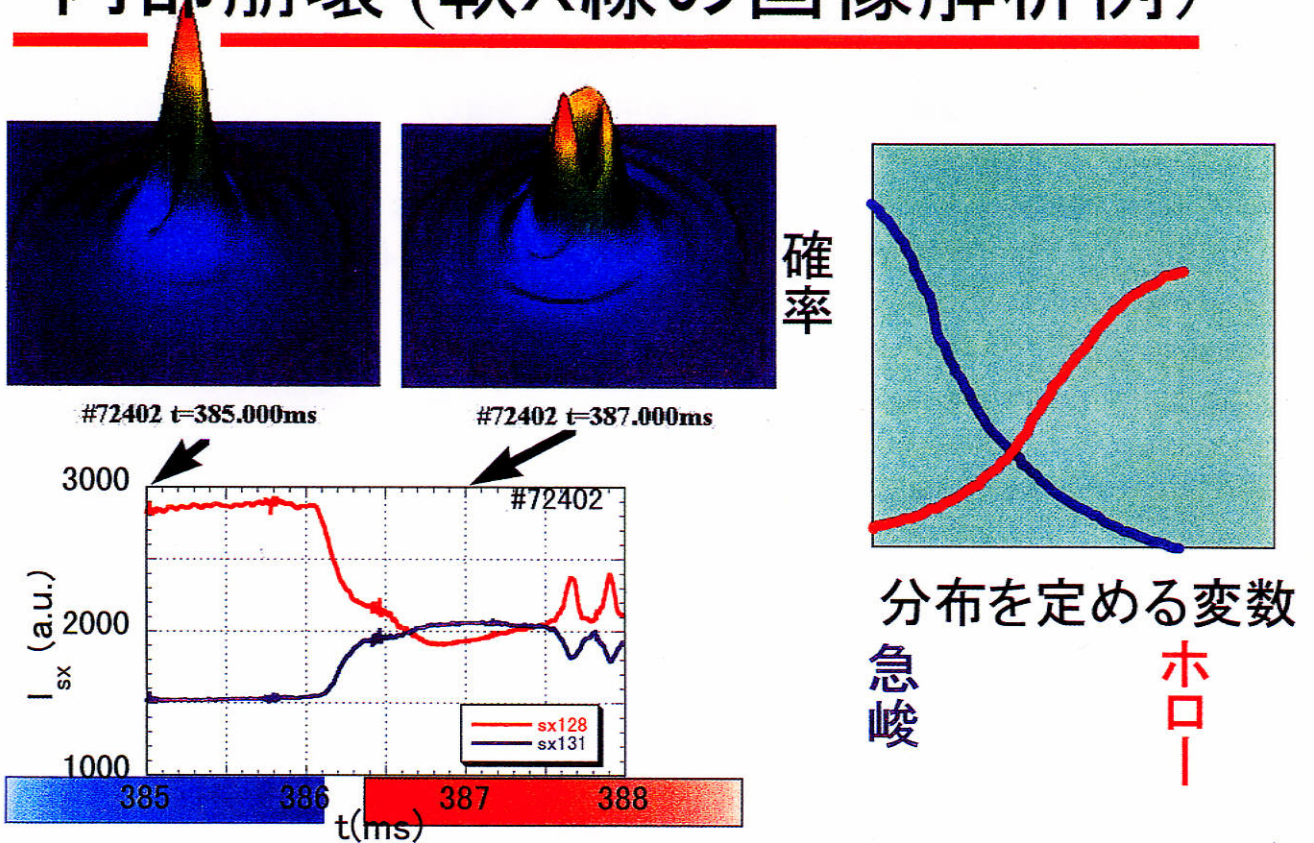


図 4

内部崩壊 (軟X線の画像解析例)



概要

- ・ 内部崩壊を駆動する物理量とは？
- ・ 内部崩壊における臨界値とは？
- ・ 平衡分布を定める秩序変数とは？

Xray 分布

(a) peaked => hollow

(b) hollow  peaked

(c) hollow

pressure 分布

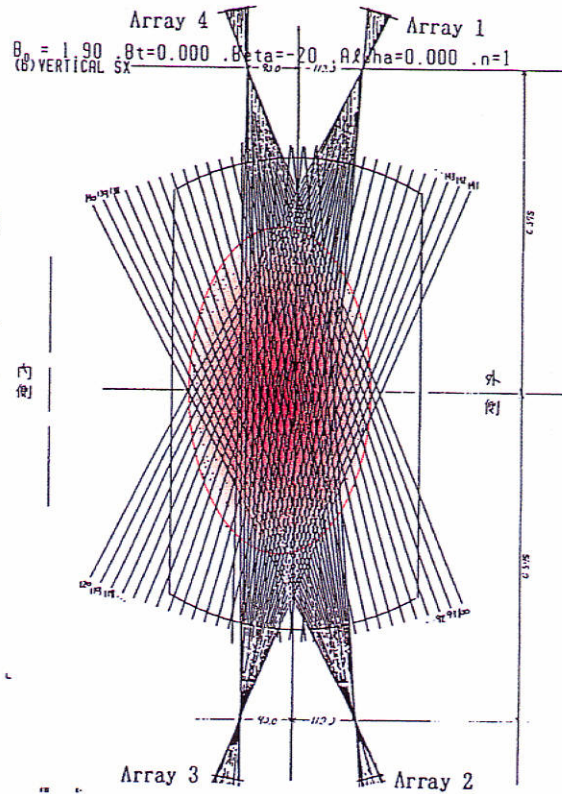
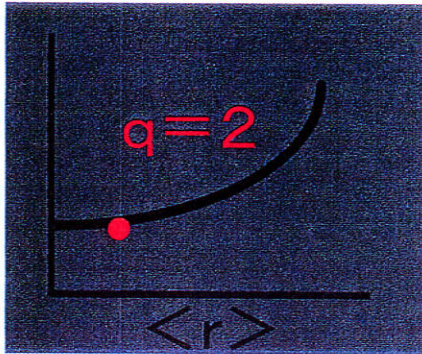
peaked

broad

flat or hollow

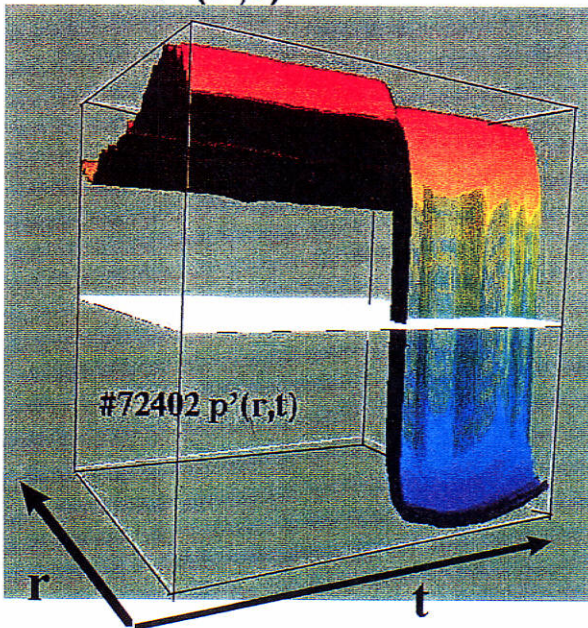
磁場配位とX線計測系

磁気丘配位
 弱い磁気シア—
 交換型モードに対して
 不安定な配位
 回転変換分布

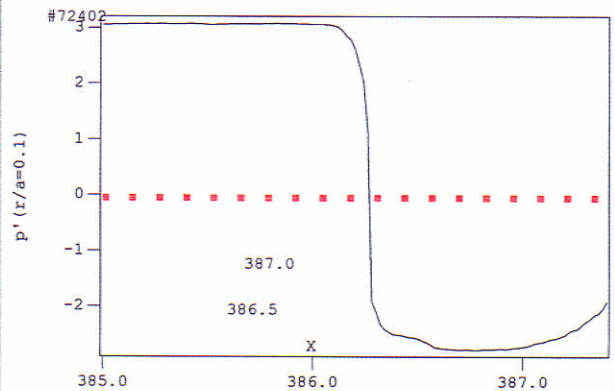


内部崩壊時の圧力勾配の変化

— $P'(r,t)$



— $P'(r=0.1,t)$



time (ms) 1ms

0.000



t (ms)

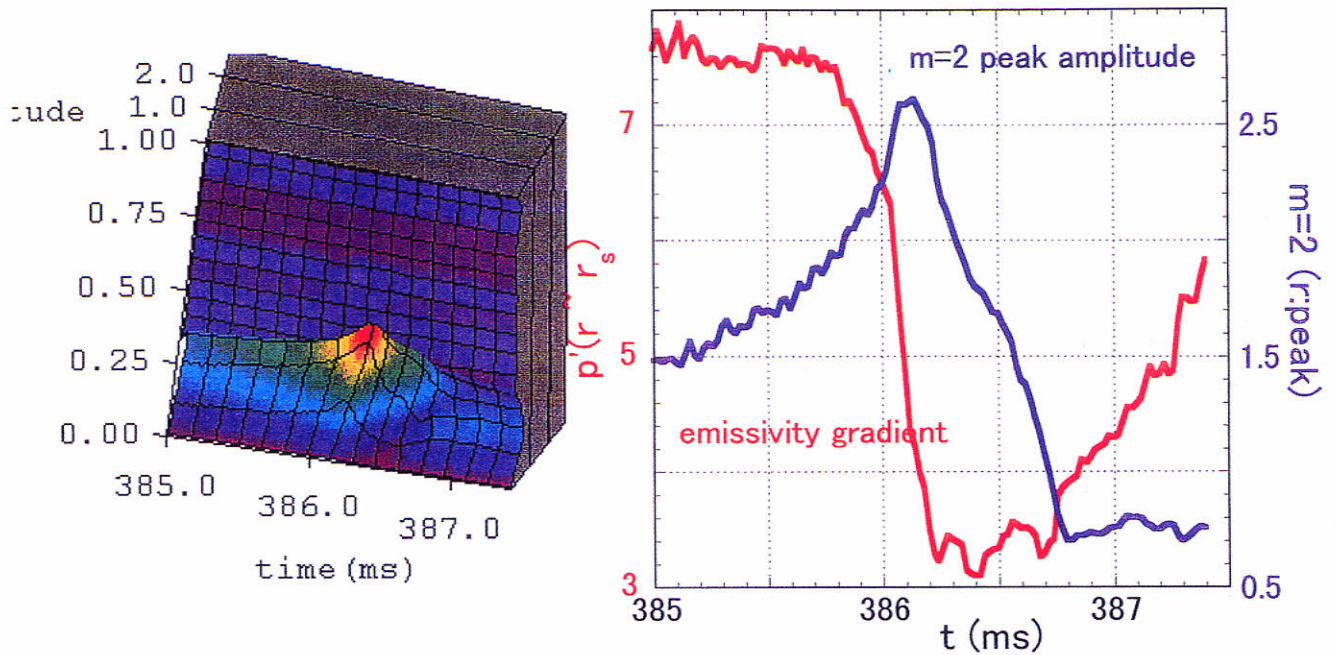
$t < t_{event}$

分布はピーク

$t > t_{event}$

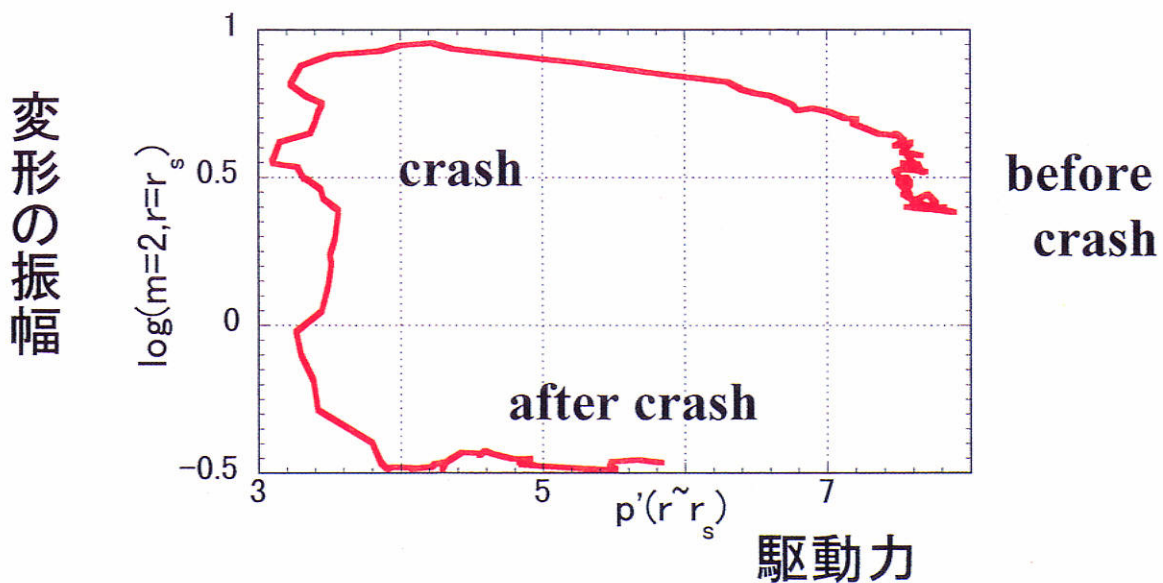
分布はホロー

内部崩壊時の揺らぎ振幅の発展



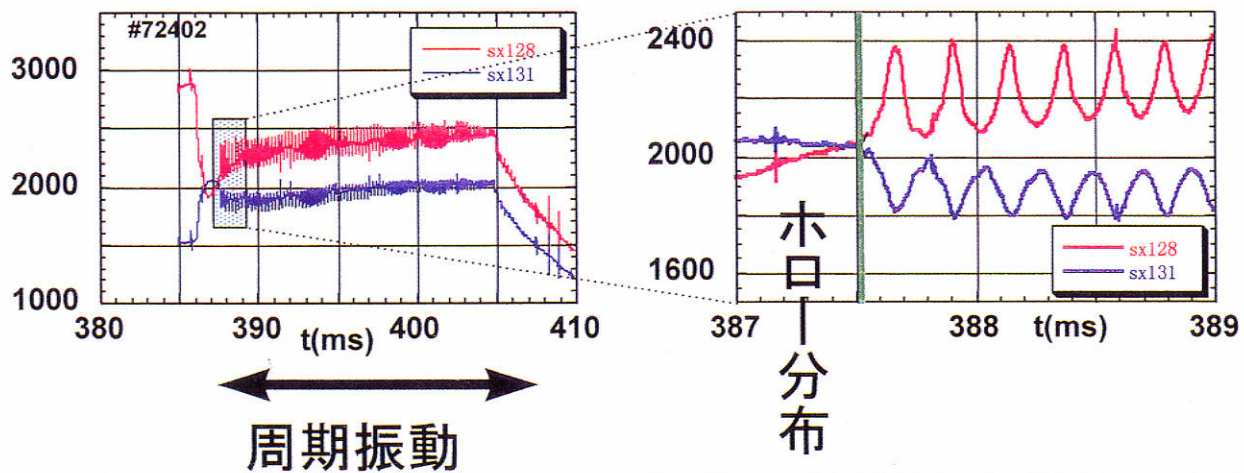
この例では内部崩壊時に $m=2$ の変形が急激に増大し分布の大きな変化を引き起こす。

揺らぎ振幅と勾配 $\nabla \varepsilon|_{q=2}$ の相関



・crash直前は p' の顕著な増大無しに変形が発達し、crash中は p' の減少にもかかわらず顕著の増大する。

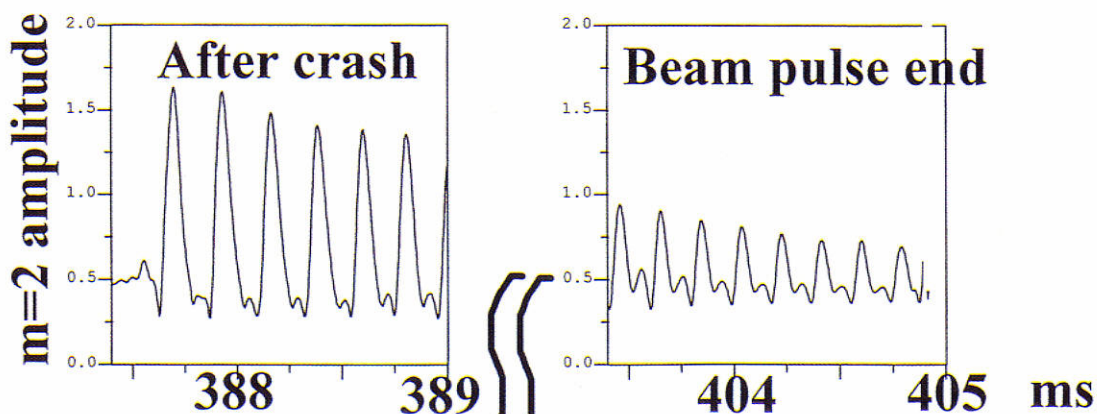
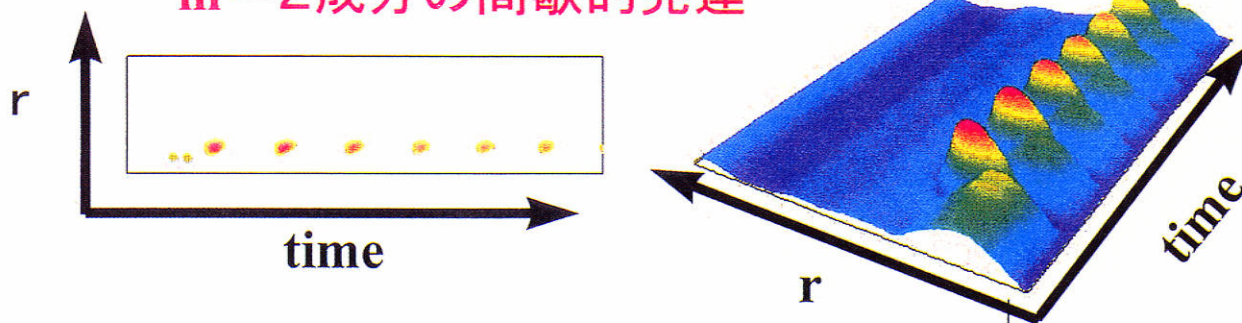
内部崩壊後の間歇振動 (hollow ↔ peaked)



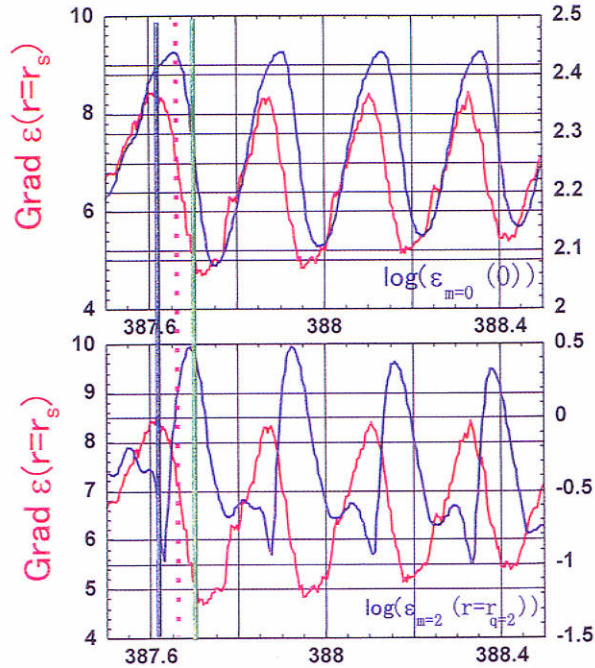
- ・振動の発現は突発的である
- ・磁気島が急激に形成？
- ・プラズマがいきなり回転？

間歇振動の画像解析例

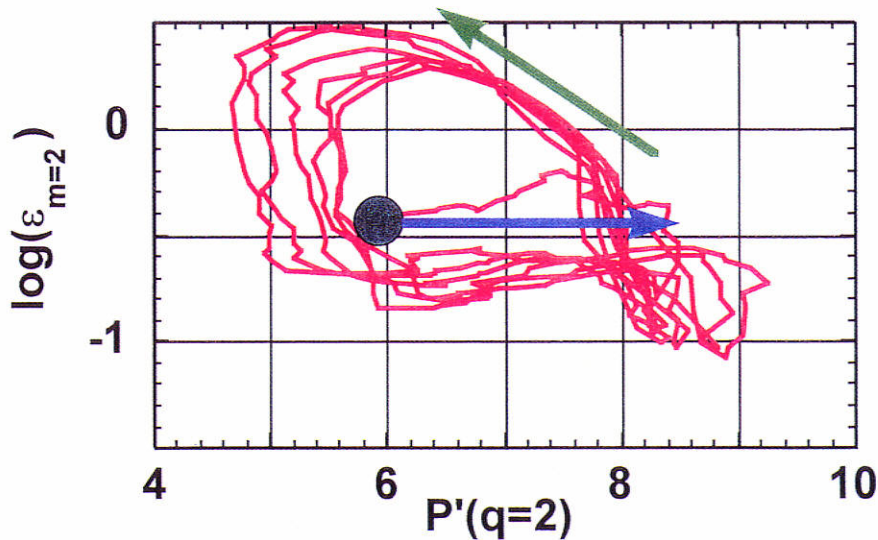
$m=2$ 成分の間歇的発達



間歇振動時のX線分布の勾配とm=2成分の振幅の時間発展



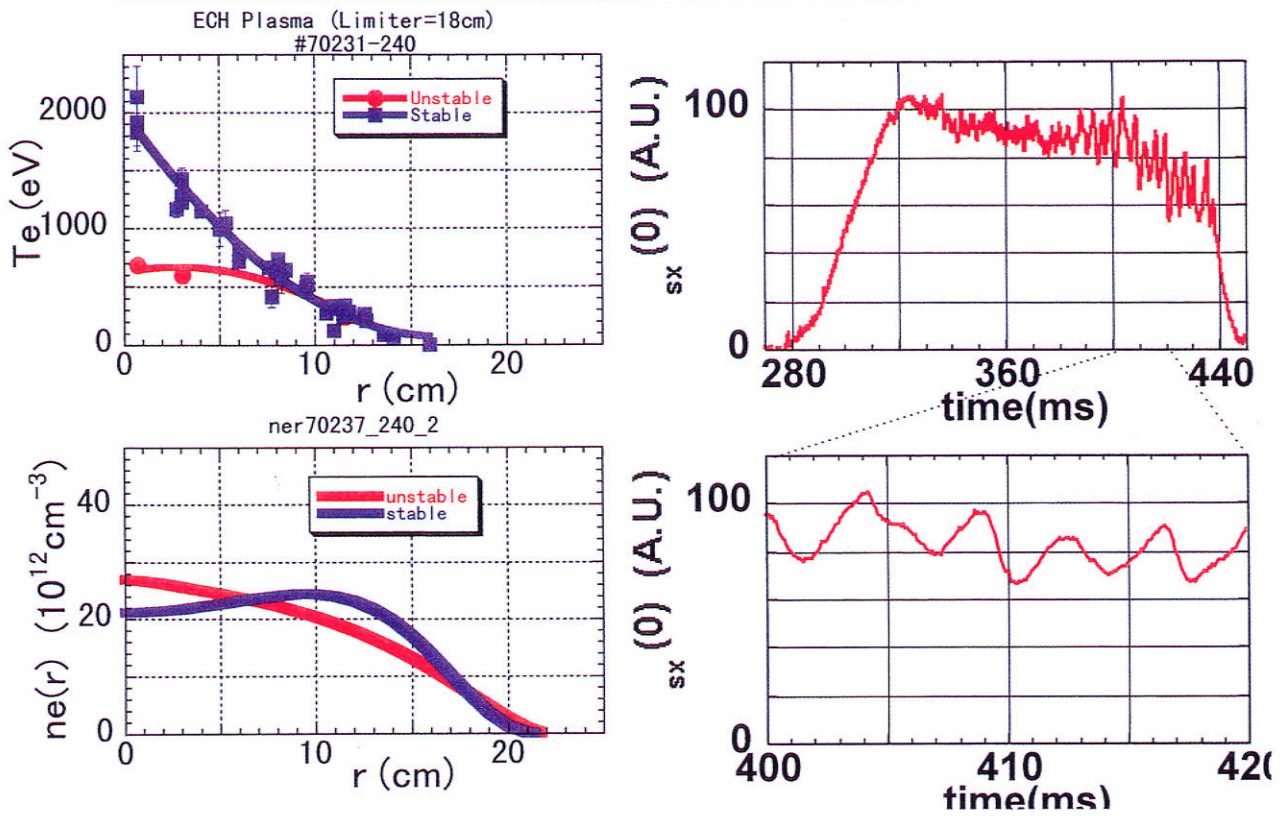
揺らぎ振幅と勾配の相関



急激な急峻化 \Rightarrow $p'(q=2)$ の減少 \Rightarrow 引き続く
 中心部への集中 \Rightarrow 揺らぎの成長 \Rightarrow 崩壊

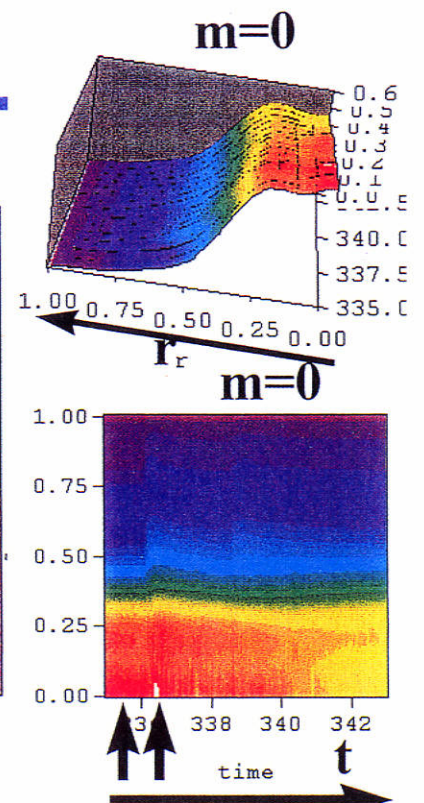
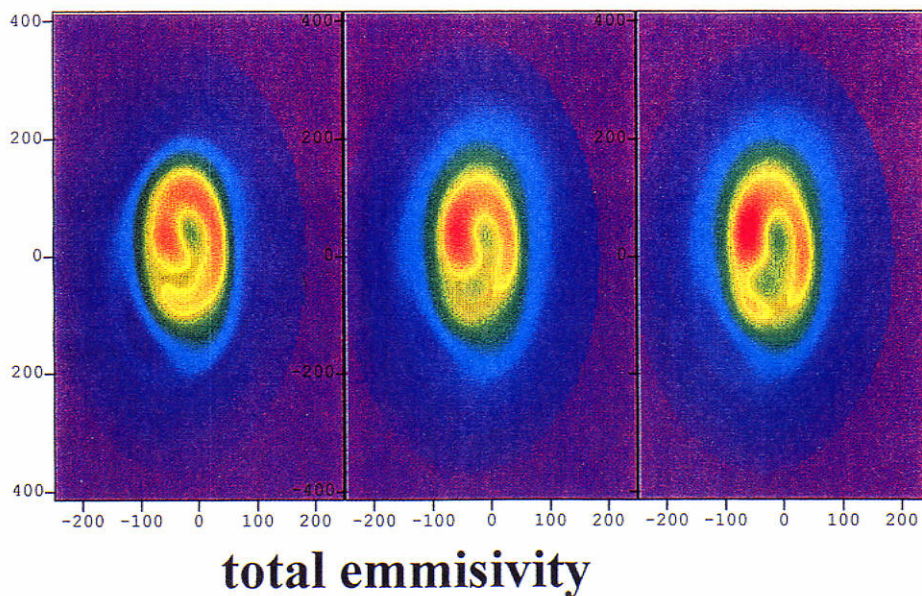
何が中心部への集中を駆動するか

hollow分布での内部崩壊



hollow分布での内部崩壊 の画像解析例

before



まとめ

- ・ 崩壊をトリガーするべき圧力勾配はすくなくとも揺らぎの成長の時定数以前には変化がないのでは
- ・ 揺らぎは圧力勾配が減少する崩壊初期にさえさらに大きく増大し続ける。
- ・ ポストカーサーとして観測される周期振動のうち間歇的に揺らぎの成長、中心部への集積の過程を繰り返すものが存在する
- ・ 圧力勾配の非常に緩やかな条件でさえ内部崩壊が起こりうる。

日本原子力研究所 那珂研究所

井手俊介、JT-60 チーム

Collapse of an Internal Transport Barrier in JT-60U discharges

JAERI, Naka Fusion Research Establishment

Shunsuke Ide, JT-60 Team

JT-60U トカマク装置における高パフォーマンスプラズマ実験においては、しばしば高閉じ込め状態は β コラプス等の突発的なイベントにより中断される。それにより、ある場合にはプラズマは L モード状態に戻り、また場合によってはそのままディスラプションに陥りプラズマが消滅してしまうこともある。

JT-60U における代表的な高閉じ込めモードである、高 β_p (H)モードプラズマ[1]や負磁気シアプラズマ[2,3]では特に、ディスラプションにつながることの多い β_p コラプスが問題となっている。これらの放電における、高い閉じ込め性能はプラズマ内部（規格化小半径で 0.4-0.7 程度）での輸送低減による内部輸送障壁の形成により得られている。しかし、内部輸送障壁の位置に大きな圧力勾配が発生し、主加熱の継続/増加に伴い勾配が増加し最後には β 限界に達しコラプスが起これると考えている。その時の放電パラメータ（安全係数あるいは電流分布や β 値等）によっては、コラプスからプラズマ全体が消滅するようなディスラプションに陥る場合がある。これは、1) コラプス自体がプラズマ全体にわたるモード構造を持つ、2) いくつかのモードが空間的に広くカップリングしてしまう、3) 新たなモードを励起してしまう、等様々な可能性が考えられが、高閉じ込めプラズマの定常化のためにはコラプスの発生原因、ディスラプションに至る過程やその回避方法を明らかにすることが重要である。

一つの例として、負磁気シアプラズマの放電波形を図 1 に示す。プラズマ中心近くを通る接線と $0.48a$ (a : プラズマ小半径) での線平均電子密度が単調に増加する一方比較的外側の $0.71a$ での線平均電子密度がほぼ一定であることから、プラズマ内部でのみ電子密度分布が成長しているのが判る、また温度分布も同様に中心領域のみで成長しているため $0.6a$ 付近に大きな圧力勾配が成長している。JT-60U における負磁気シア実験では一般に、圧力勾配が最大の位置（内部輸送障壁の位置）は安全係数が極小値 (q_{min}) を取る位置の近傍にある。一番下の図に示すのがいくつかの小半径位置での安全係数の時間発展である。 $0.48a$ での値が常にそれより外側での値より大きいことから負磁気シアが最後まで続いていることが判るが、 $0.66a$ での値が、 q_{min} に近いと考えている。この値はコラプスによりディスラプションする直前ほぼ 2 になっている。負磁気シア放電の場合は、このように q_{min} が整数値 (2, 3) 近傍になったときにディスラプションすることが多い。

実験データに基づくキंकバルーニングモードの β 限界を解析すると、 q_{min} が整数になる近傍では β 限界が下がること示される。図に示すように蓄積エネルギー ($\Leftrightarrow \beta$ 値) が増大する一方 q_{min} が 2 に近づくことにより低下した β 限界にかかりコラプスが起これると考えられる。コラプス直前の β 値は解析により得られる値とほぼ一致することが示されている。しかし抵抗性モード的な振舞いの揺動も観測される場合があり、キंकバルーニング

モードのみで説明しきれるとは断定できない。

高 β_p プラズマの β 限界の場合も同様に、キックバルーニングモードによる β 限界とほぼ一致することが示されている。

これら β_p コラプスの場合、先に述べたようなディスラプションに至るような時以外でも、空間的にはプラズマの全域に渡って影響を受けていることが多い。しかし場合によって、局所的に小さな崩壊現象が起こることがある。内部輸送障壁の位置に見られることから、Barrier Localized Mode (BLM) と呼んでいる。 β_p コラプス、BLM共に $10^{-100}\mu\text{s}$ 程度の時常数でコラプスに至る。また、コラプスと同時に観測した磁気プローブ信号からトロイダルモード数は低い($n=1,2\dots$)と考えられる。BLMの場合、低 n にもかかわらず空間的に局在しており、興味深い。また、プレカーサーを伴わない場合がほとんどである。図2に電子温度の変化の割合の空間分布を、BLMの場合(直線)とプラズマ全域に影響するような β_p コラプスの場合(点線)について示す。BLMの場合には輸送障壁(言い換えると圧力勾配の最大のところ)近傍でのみ温度の減少が見られ、 β_p コラプスの場合には中心にまで影響が及んでいるのが判る。BLMの場合の局在性について、輸送障壁の位置での磁気シアの形状との関連が考えられる。

これらの結果は、圧力分布をはじめ電流分布などの系統的な研究の重要性を示しており、本講演ではJT-60Uにおけるこれら β_p コラプスやBLM等の現象について、時間的/空間的な特徴や因果関係等について実験データに基づいた議論を行う予定である。

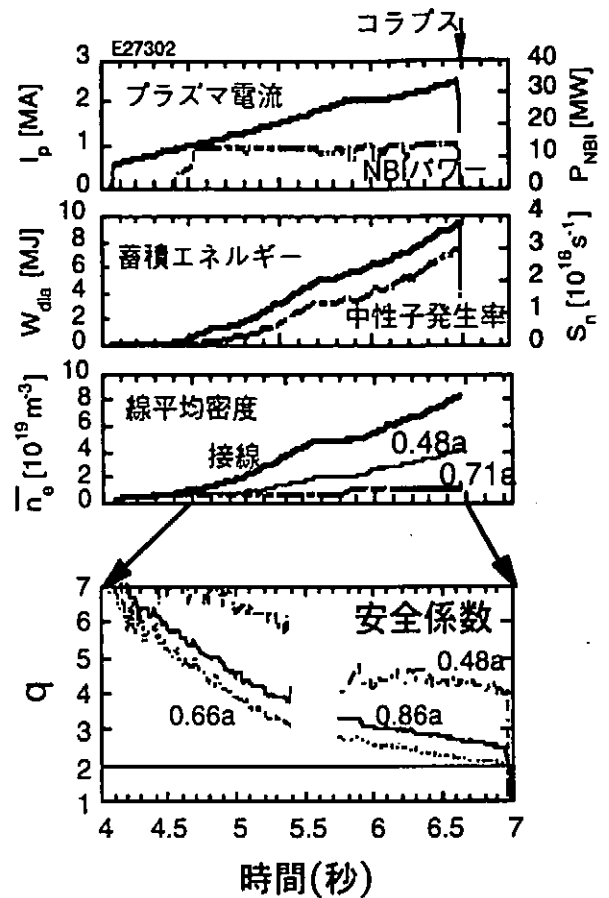


図1: 負磁気シアプラズマの放電波形。

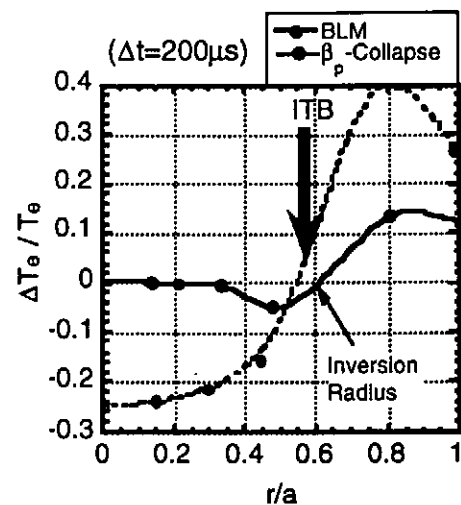


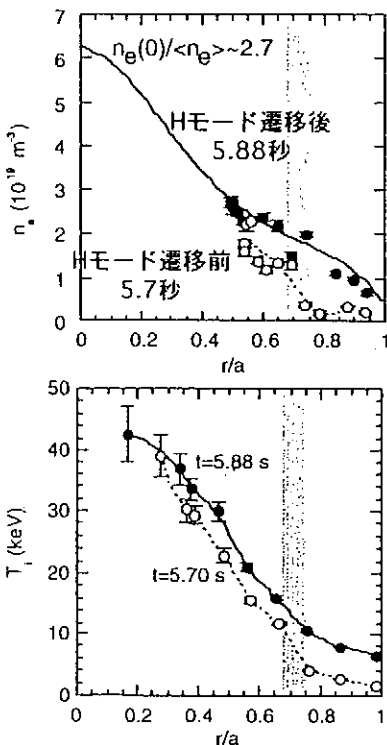
図2: BLMと β_p コラプスでの、電子温度変化率の空間分布

- [1] S. Ishida et. al, 16th Fusion Energy Conference Montreal (1996) A3-1
- [2] T. Fujita et. al, 16th Fusion Energy Conference Montreal (1996) A1-4
- [3] 井手俊介、JT-60 チーム、本会合 29aYL10

- JT-60Uにおける高閉じ込めプラズマ
 - プラズマ内部で温度/密度分布に強い勾配のつく場所が存在する ⇒ 内部輸送障壁の形成
 - 高 β_p (H)モードプラズマ
 - 負磁気シアプラズマ
 - これらのプラズマでは蓄積エネルギーの上昇は、突然のプラズマの崩壊（中心部のみ/プラズマ全体）によって制限されることが多い。 ⇒ β_p コラプス
 - 高 β_p (H)モードプラズマでは、全体のパフォーマンスにはあまり影響を及ぼさない輸送障壁に局在したモードが発生することがある。

高 β_p (H)モードプラズマでの分布

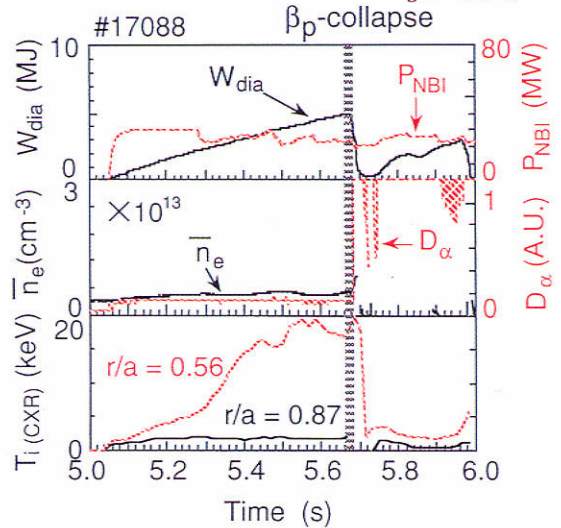
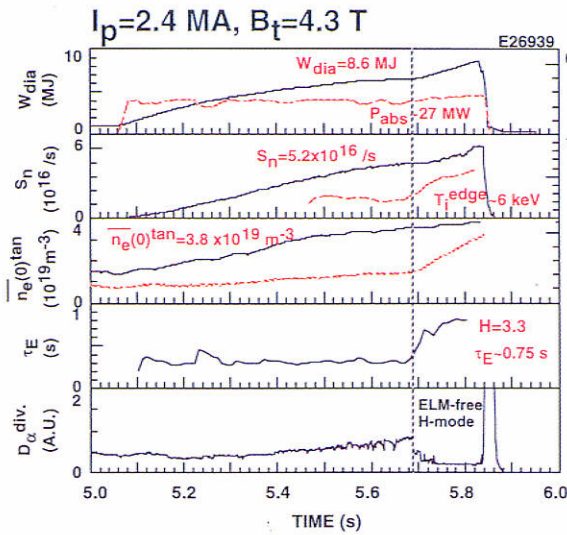
$I_p=2.2$ MA, $B_T=4.4$ T



- 電子密度、イオン温度分布に急峻な勾配が現れる。
 - ⇒ 内部輸送障壁(ITB)の形成
- 輸送障壁より内側で閉じ込めが改善
 - ⇒ 電子密度、イオン温度分布がピーキング
- さらにHモード遷移する場合がある。
 - 中心領域+周辺領域で閉じ込め改善
- プラズマ圧力が増加を続け、ベータ限界に達する場合がある

High β_p (H)モードプラズマにおける崩壊現象(1)

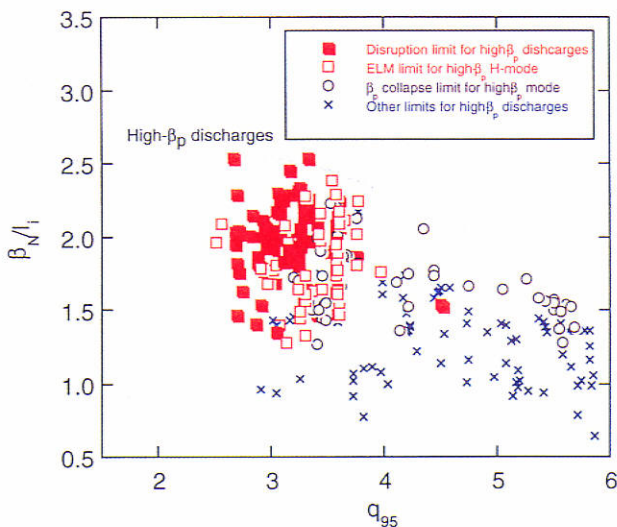
JT-60U



- ベータ限界に達したときに
 - プラズマ全体が消滅する場合
 - 輸送障壁より内側のプラズマが吐き出され分布が平坦化するだけで、放電は続く場合

放電領域による違い

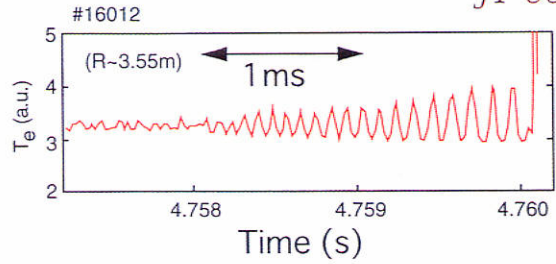
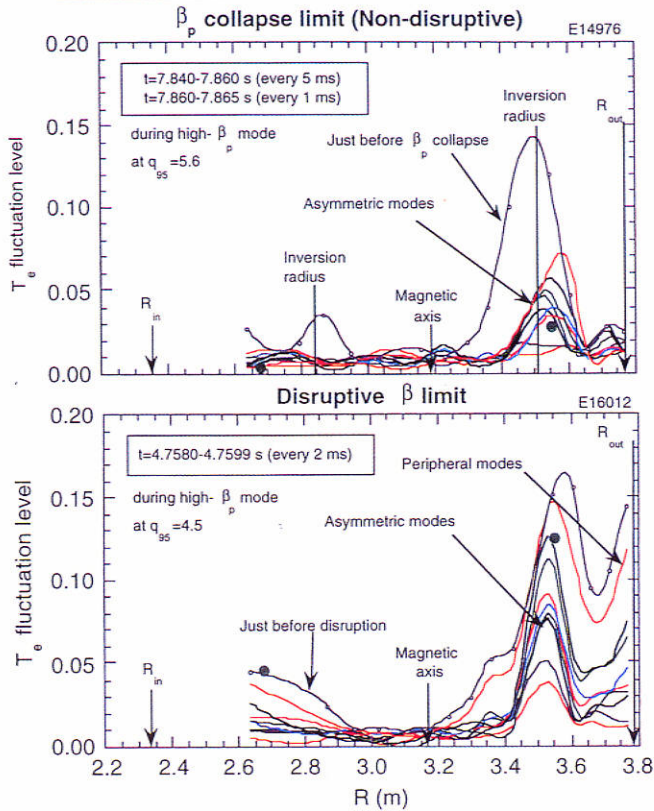
JT-60U



- 安全係数の高い放電
 - ⇒ ディスラプションには至らない
- 安全係数の低い放電
 - ⇒ ディスラプションに至る
- Hモード化しているかどうかは、ディスラプションとは相関がない
 - Hモード化したことによりELMが発生し、ELMがディスラプションのきっかけになる場合はある

電子温度揺動の空間分布

JT-60U



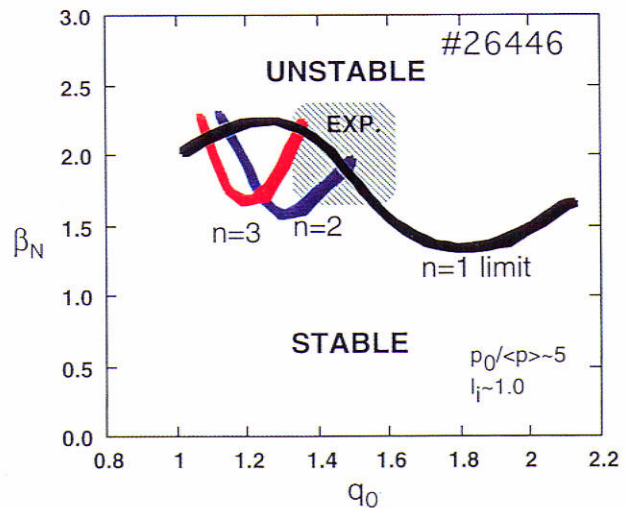
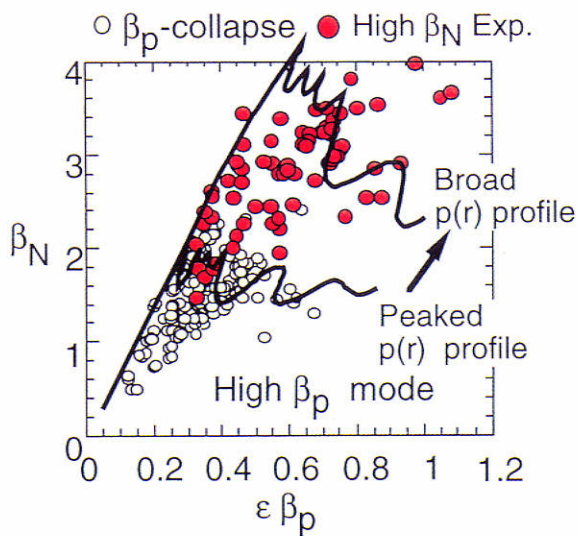
- コラプス直前に磁気プローブや電子温度(ECE)の信号に揺動が観測される場合がある。

成長率 : 0(msec)

- 電子温度揺動の割合($\delta T_e/T_e$)の空間分布
 - 強い内外非対象性
 - ディスラプションに至らない場合
輸送障壁近傍に局在
 - ディスラプションに至る場合
表面近傍に別の(?)揺動が存在

JT-60U

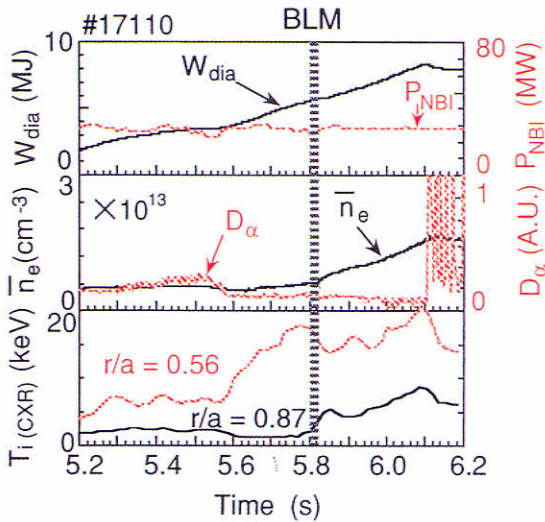
圧力分布⇒平坦化



- ベータ限界は理想キックバルーニングモードの限界とほぼ一致する。

High β_p モードプラズマにおける崩壊現象(2)

JT-60U

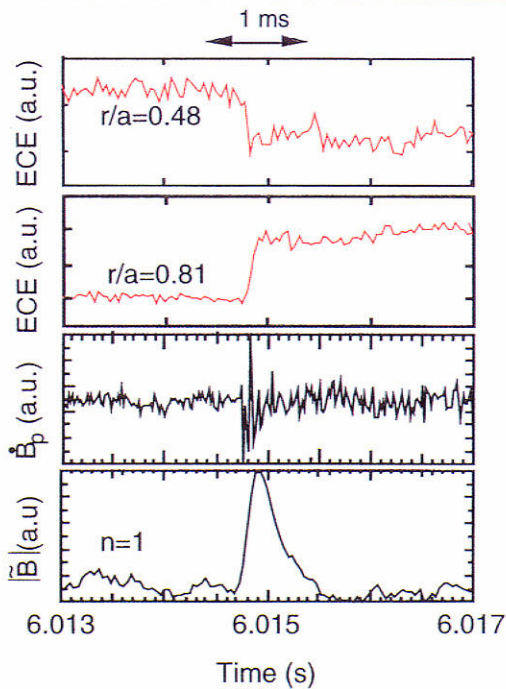


Barrier Localize Mode (BLM)

- 高 β_p モード放電で観測される
- 内部輸送障壁の位置に局在化する
- 全体のパフォーマンスには大きな影響がない
- BLMをきっかけにHモードに遷移する
場合がある。
 - ⇔SawtoothによるHモードの誘起
 - H遷移を誘起しない場合もある
 - BLM無しでもH遷移はおこる

BLMの振舞い

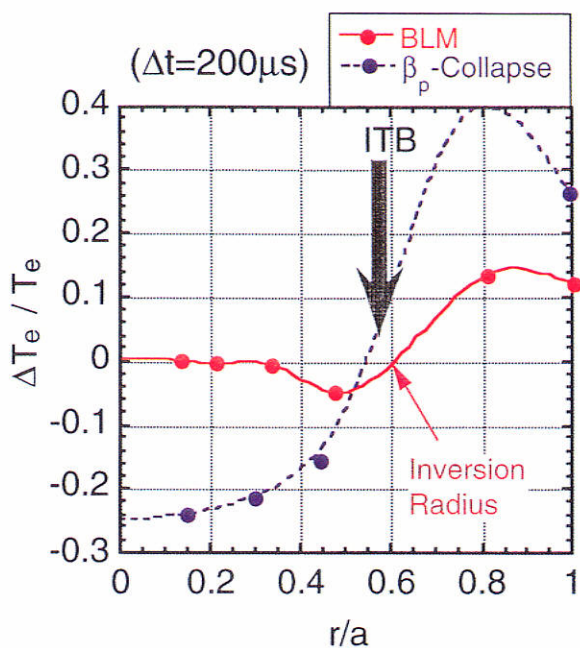
JT-60U



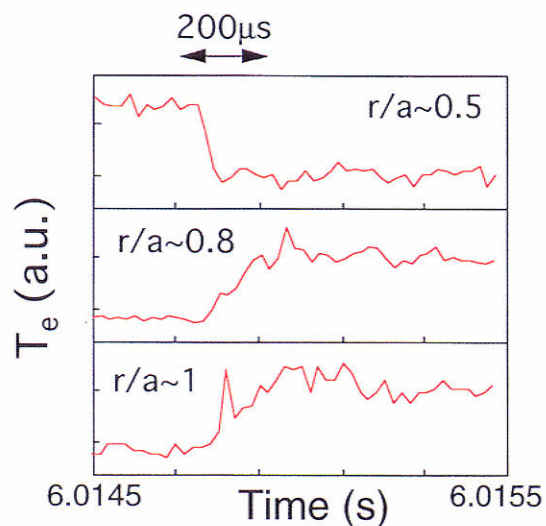
- 輸送障壁近傍で電子温度の減少
- 輸送障壁外側で電子温度の増加
- ⇒ 吐き出し現象
- 磁気揺動を伴う
トロイダルモード数 $n=1$ を常に観測
($n=2, 3$ モードを伴う場合もある)
- 成長率 $\sim 100\mu\text{s}$ オーダー

BLM/ β_p コラプスによる温度分布の変化の比較

JT-60U

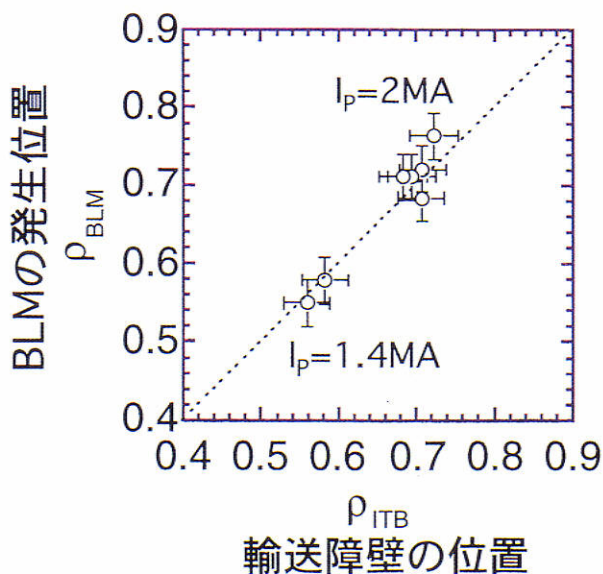


- β_p コラプスの場合には、プラズマ中心領域まで大きく減少
- BLMは、輸送障壁近傍からのみの吐き出し

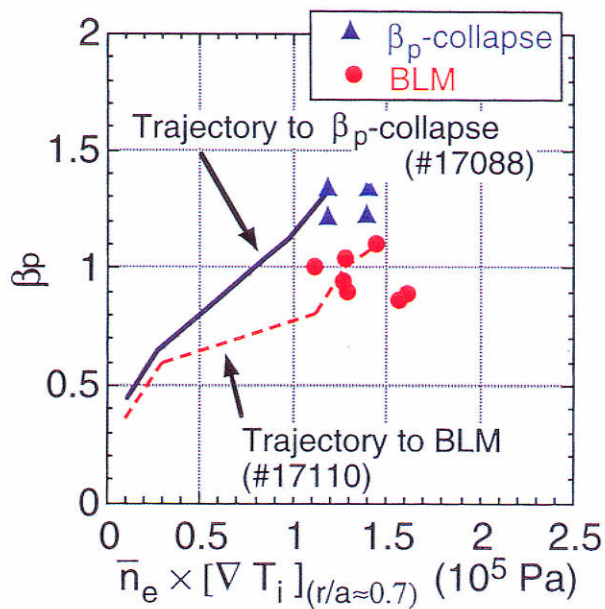


BLMと輸送障壁の位置の相関

JT-60U

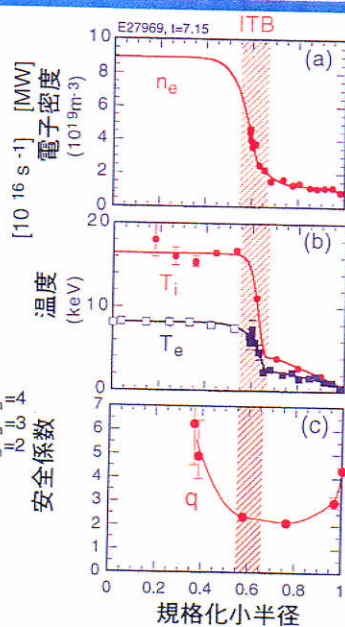
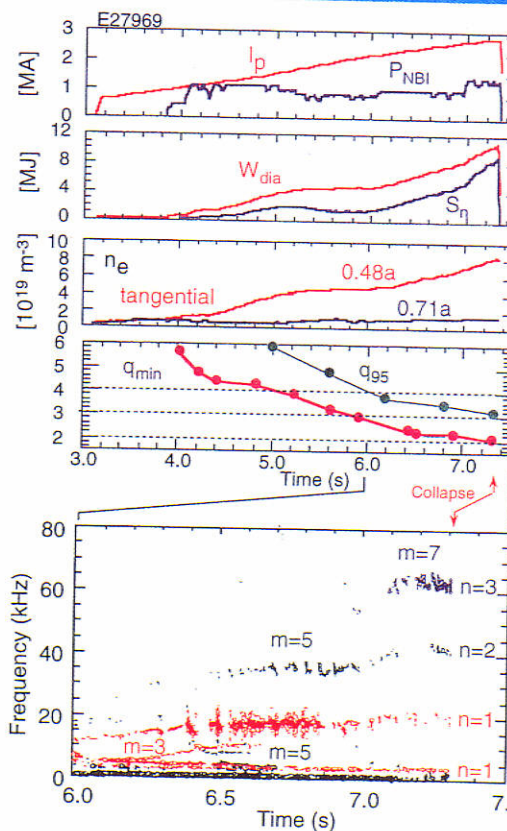


BLM/ β_p コラプスの発生条件



- BLMが発生する β_p の値は β_p コラプスが発生する場合に比べて低い
 - この時の輸送障壁での圧力勾配は、同程度
- ↓
- ITB位置でq分布が平坦化すると、理想キンクバルーニングモードの計算では低nであっても径方向に局在化した固有関数を持つモードが出現しうる。
 - ITB位置に強く局在化したブートストラップ電流？

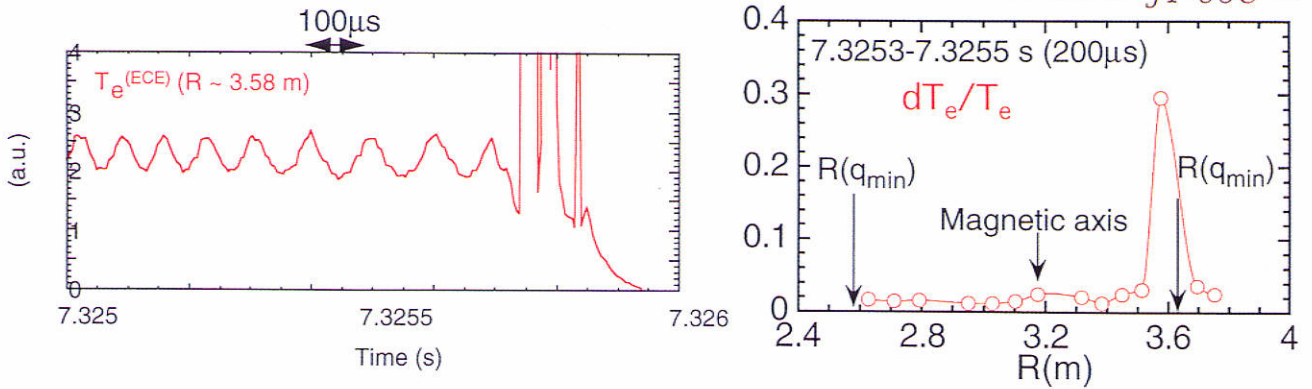
負磁気シアプラズマ



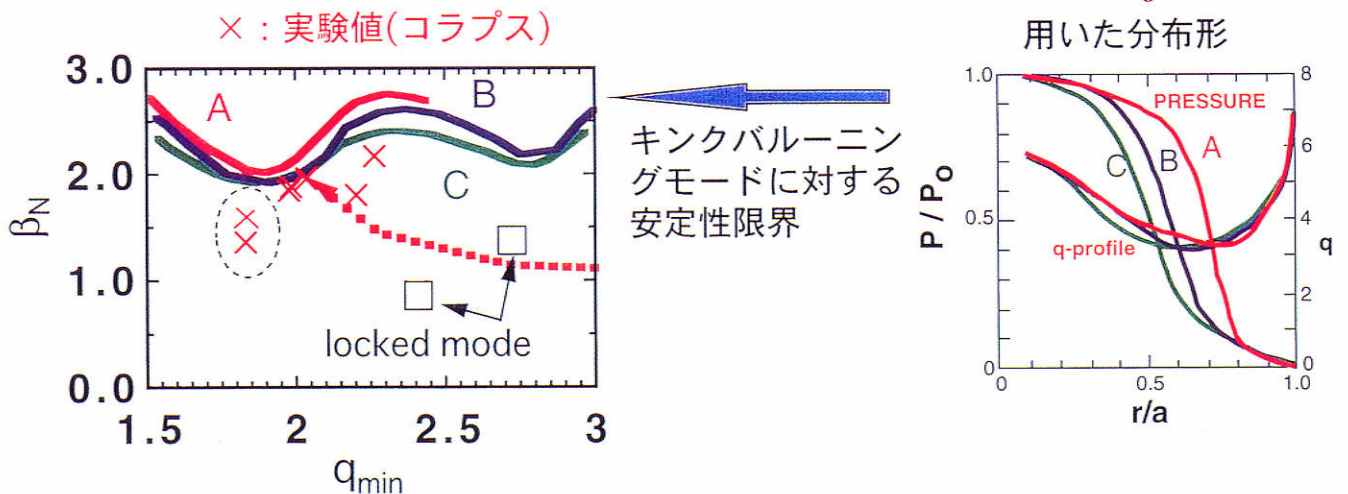
負磁気シアプラズマ

- 磁気シアが内部で負
- 密度/温度(el, ion)に内部輸送障壁が存在
- 圧力勾配は q_{min} の位置より、少し内側で最大になる。

- プラズマ性能の上昇はコラプスにより制限される
- この時 q_{min} は単調に減少しており、性能の良い放電の場合 $q_{min} \sim 2$ でコラプスする
- q_{min} が下がるに従って、多くの低n/mモードを観測



- 負磁気シアプラズマでは、ほとんどの場合ベータ限界でプラズマは消滅（ディスラプション）する。
- ディスラプション直前に電子温度や磁気プローブ信号に揺動が見られる場合がある。成長率：0(ms~10ms)
 ディスラプション自体は突然トリガーされているように見える。
- 電子温度の揺動は強い内外非対象性を持つ。
- 周辺モードは見られない。（電子温度／磁気プローブ信号）



- 高性能放電では、多くの場合 $q_{min} \sim 2$ でディスラプションが発生する。
- この時のベータ値は $\beta_N \sim 2$ で、 $n=1$ キックバルーニングモードの安定性限界とほぼ一致する。

$q_{min} \sim 2$ に到達するまでに低ベータでコラプスすることもある
 ⇒locked mode等

ま と め

JT-60U

• 高 β_p (H)プラズマにおける β_p コラプス

- ディスラプションに至らないもの
- ディスラプションに至るもの
- コラプスと直接的な因果関係があるかは不明だが、内外非対象性の強い揺動が電子温度に見られる。
 - モード構造が局在している \Rightarrow ディスラプションしない
 - プラズマ周辺にもモードが存在 \Rightarrow ディスラプションする
- 低 n キंकバルーニングモードの β 限界とほぼ一致
- Barrier Localized Mode
 - 低 n モードにもかかわらず輸送障壁に局在

• 負磁気シアプラズマ

- $q_{\min}=2$ で性能の上限が押さえられている
- $n=1$ キंकバルーニングモードの β 限界とほぼ一致
- コラプスと直接的な因果関係があるかは不明だが、内外非対象性の強い揺動が電子温度に見られる。
 - モード構造が局在している \Rightarrow ディスラプションする

5. TFTRにおけるHigh-beta collapse

核融合科学研究所 長山好夫 (16889F)

核融合プラズマ物理の課題は閉じ込めとMHD不安定性である。閉じ込めの良いプラズマを加熱すればいくらかでも温度が上がるわけではない。強力なNBI加熱をすると温度が上昇していくが、途中で突然温度が下がる。これをbeta-collapseと呼ぶ。その後、低次の ($m/n=1/1, 4/3, 3/2, 2/1$ あるいはそれらの混合) モードのMHD不安定性が発生して、閉じ込めを大幅に悪化させ温度上昇しなくなる。これをbeta-degradationと呼ぶ。これは最初にPBXで報告されたが、どのトカマクでも共通に見られる現象である。

TFTRでは、 β がTroyon限界の半分を超すあたりからbeta-collapseが発生しはじめ、 β は決してTroyon限界を越えない。軽微な崩壊では中心部の変化なしに $q=1.5$ や2などの有理面近傍だけが急速に平らな温度分布になり、低次のモードが発生し温度が飽和したりゆっくりと減少したりする。普通は、有理面近傍が平らになった直後にそれより遅い時間スケールだが中心部の温度が急減し、マイナーディスラプションになる。最も甚だしいときはハードディスラプションになる。

局所的電子温度測定であるECEで観察するとトラス外側の有理面近傍で細かい振動が発生することが分かる。軟X線では視線方向に平均化されるのでこの振動の振幅がはるかに小さい。これはモード数が高いことを示している。崩壊が激しいほどこの振動数は大きく(すなわち高次のモードに)なり、ますます軟X線では見難くなる。マイナーディスラプションを選んで観察するとたまたまECE計測器と軟X線で同時にモードを捉えることができた。隣のポートの軟X線信号との時間遅れからトロイダルモード数が同定できた。また、ポロイダル方向の軟X線信号に時間遅れが現れ、これからポロイダル数が同定でき、同時にポロイダルおよびトロイダル方向に局在したモードであることが分かった。

Parkの3次元MHDシュミレーションによるとTFTRの高 β ディスラプション直前の条件下では低次のモードがバルーニングモードを誘起することがわかった。シュミレーションで得られたバルーニングモードの様子は実験とほとんど同じである。その後、ECE計測器をトロイダル方向に増設し、ディスラプション時でもモードのトロイダル方向の局在化が確かめられた。こうして、バルーニングモードがbeta-collapseを起こすことがわかった。

今後、パラメータ向上のためには第二安定化などのバルーニングモードの抑制が新たな課題となるが、縦長D形断面の大電流球状トラスはその最も有力な候補である。

29pYL10

TFTRにおける High-beta collapse

長山好夫

核融合科学研究所

Y. Nagayama, S. Sabbagh, J. Manikam, et al., Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 2376.
Y. Nagayama, M. Yamada, S. Sabbagh, et al., Phys. Fluids B5 (1993) 2571.

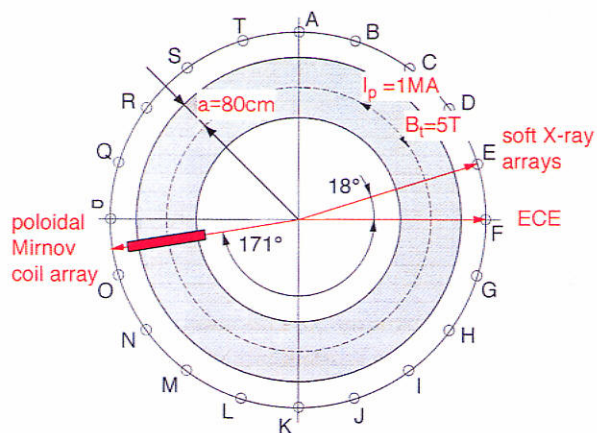
- 環境問題を考えるとトリチウムは使えない。
- DD核融合のためには高温、高 β が要求される。
- 高温、高 β トカマクプラズマでは β 崩壊が発生する。
- β 崩壊はバルーニングモードによって引き起こされる。
- β 限界を打ち破るため第二安定化やST等の新しいコンセプトが切望される。
- STARTでは $\beta \sim 20\%$ が達成された。

MHD Diagnostics in TFTR

TFTRは主半径260cm、副半径95cmの円形断面トカマクである。

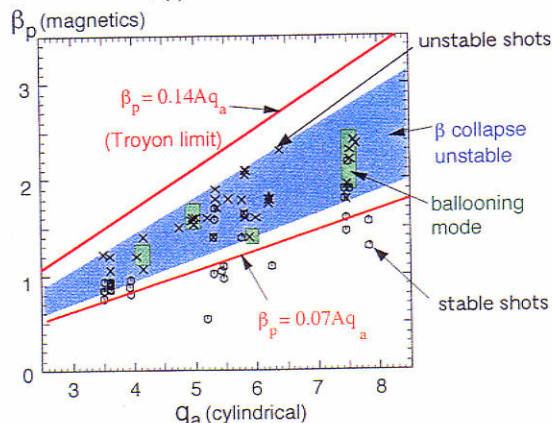
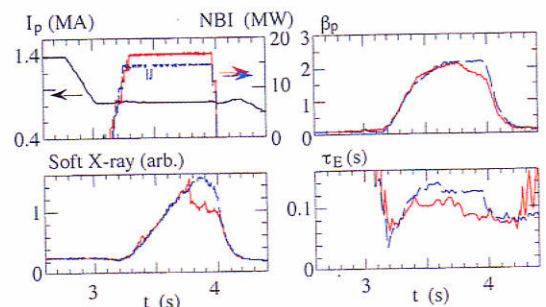
実験は、高 β_p モードで行われた。

高 β 実験は閉じ込めが良くなくてはできないが、supershot+Hモードプラズマである。



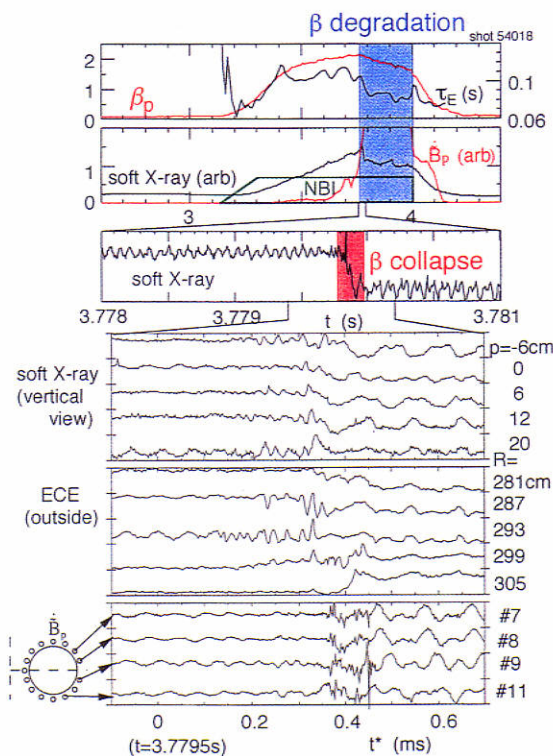
Troyon限界と β 崩壊

- 加熱パワーが大きすぎると β 崩壊が起きる。
- β 崩壊はTroyon限界の半分から上の β で起こる。
- バルーニングモードも同じ領域で観測される。
- Troyon限界を超えるshotは見られ無い。



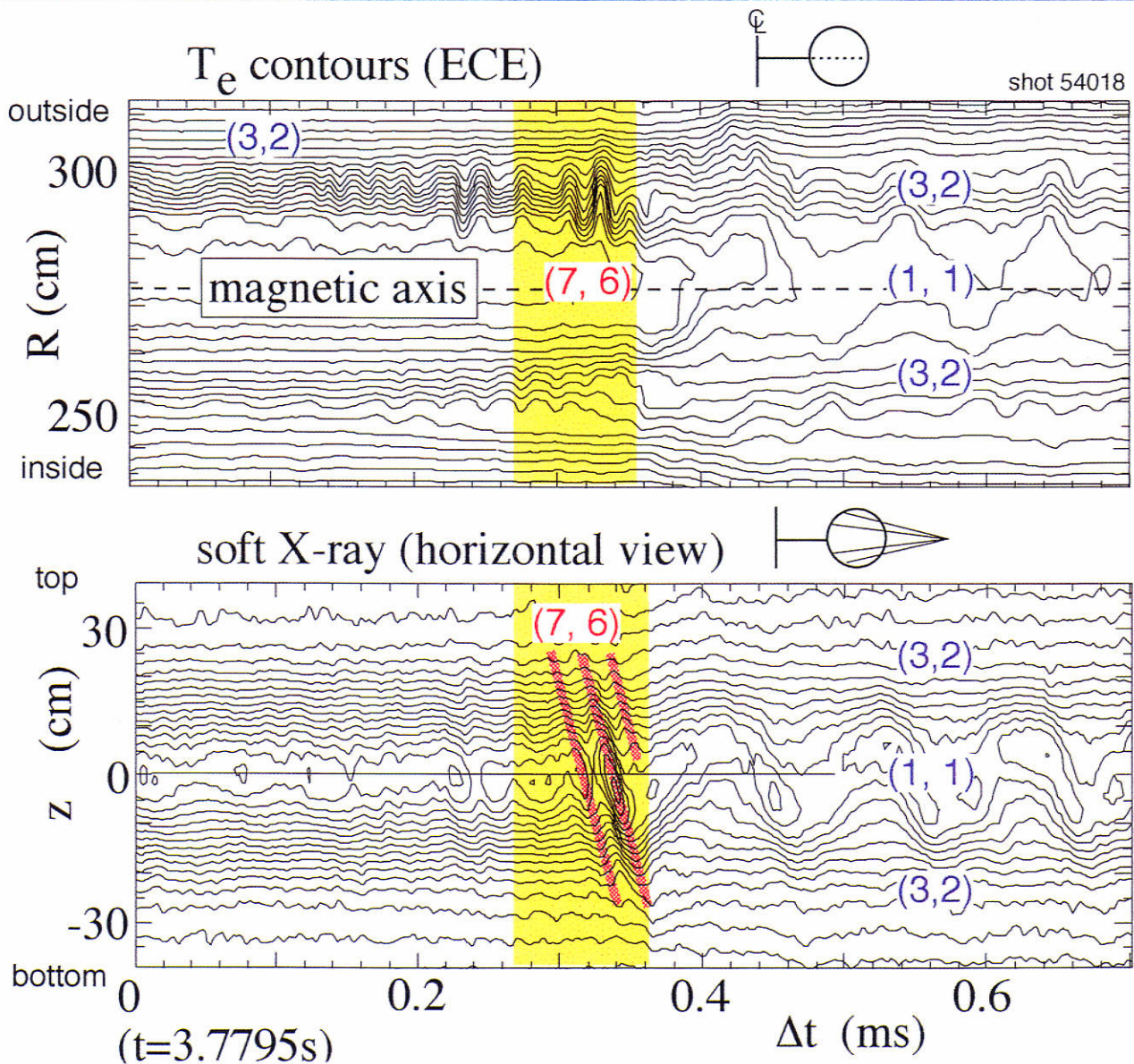
β 崩壊

トカマクには加熱中に突然緩和現象(β collapse)が起り、閉じ込めが悪化する現象(β degradation)がある。



β 崩壊のMHD不安定性

- β 崩壊では磁気軸の外側で崩壊が起こり中心部は残る。
- その後、MHD不安定性による閉じ込めの悪化で中心部の温度も下がる。
- バルーンモードが β 崩壊を引き起こす。



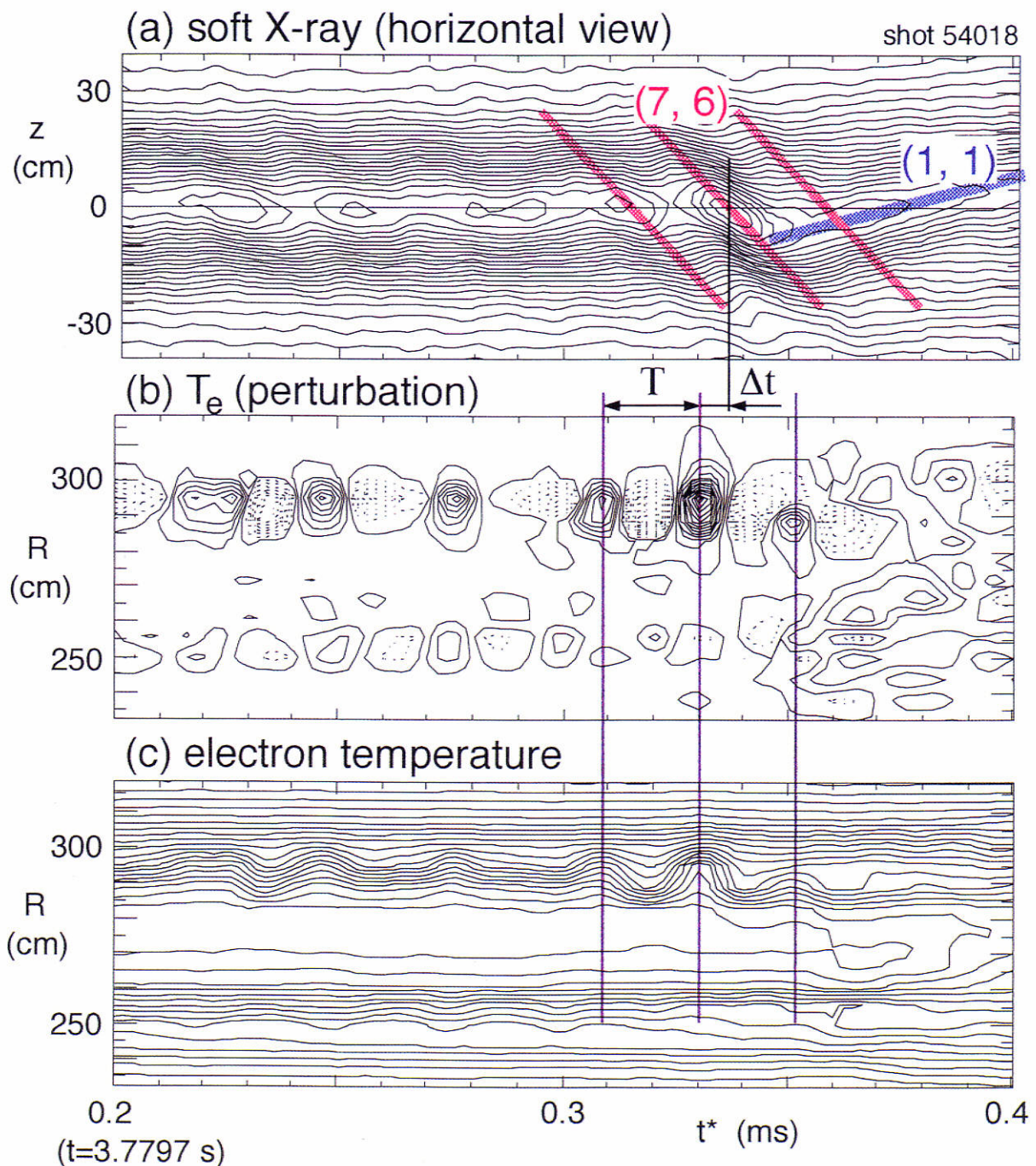
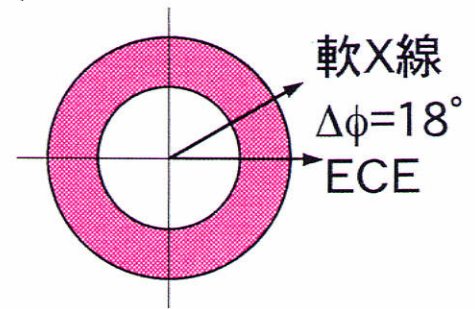
- Strong high n modes are observed in the bad curvature region (ballooning feature).
- The line-integrated soft X-ray emission profile shows a ballooning mode structure.

トロイダルモード数の決定

トロイダルモード数 n は

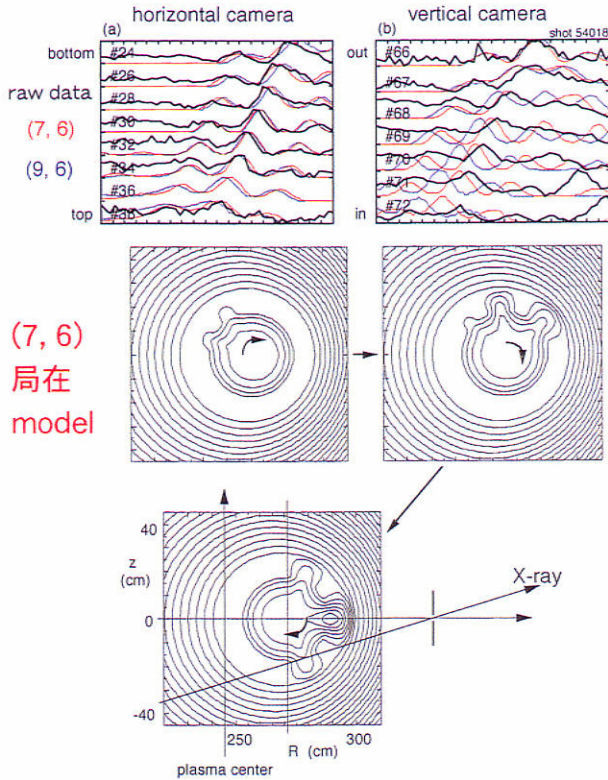
$$n = \frac{2\pi \Delta t}{\Delta\phi T}$$

で求め、 $n=6$ を得た。



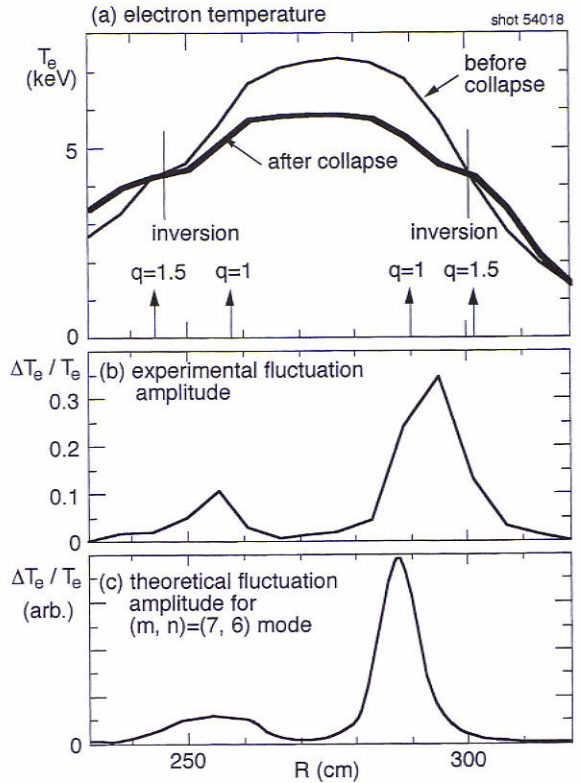
軟X線波形と局在モード

- 三つの波が走る現象はトロイダル、ポロイダル両方向に局在した三つのでこぼが良く説明する。
- $(m, n)=(7, 6)$ モードが軟X線波形を最も良く説明する。



(7, 6)
局在
model

観測されたバルーニングモードの大きさは理論的予測と矛盾しない。



β崩壊の理論

W. Park et al., P.R.L. 75 (1995) 1763

- 高βではTroyon限界以下でも低nモードが発達し、バルーニングモードを不安定化する。
- バルーニングモードは急峻な圧力分布を作るので、一度起こると圧力が平らになるまで止まらない。

高βディスラプション

E. D. Fredrickson, et al., Phys. Plasmas 2 (1995)

- 二つのGPCを用いたECE測定によって、高βディスラプションでもバルーニングモードが同定された。
- n=1モードが急峻な圧力勾配を作りバルーニングモードを引き起こす。
- バルーニングモードはトロイダル方向に局在する。

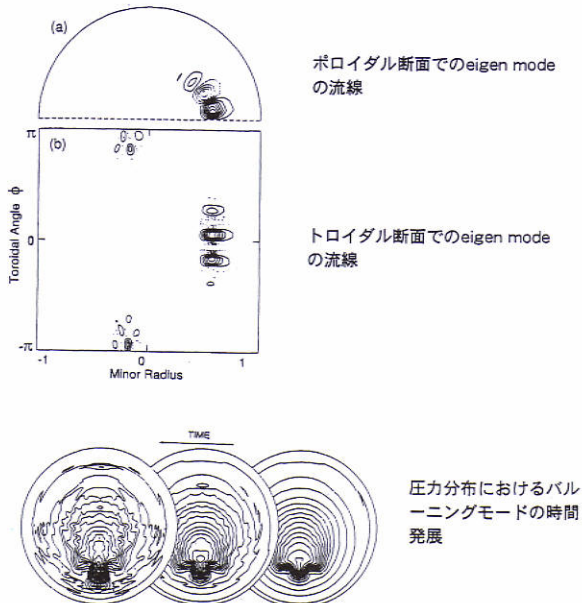
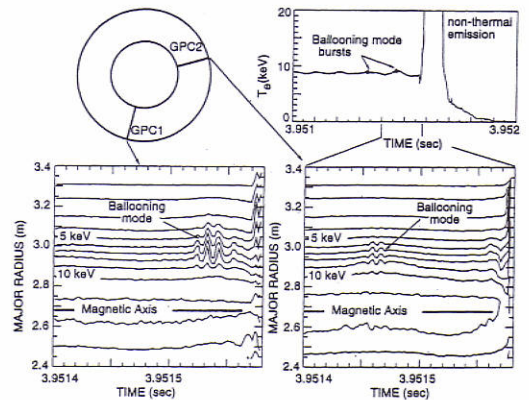


FIG. 4. The nonlinear time development of the pressure.

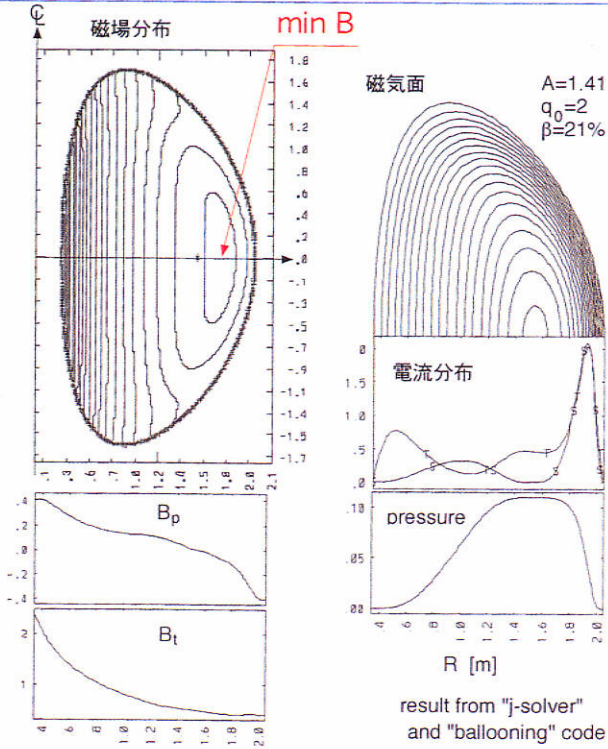


- MHDシミュレーションは実験と良く一致する。



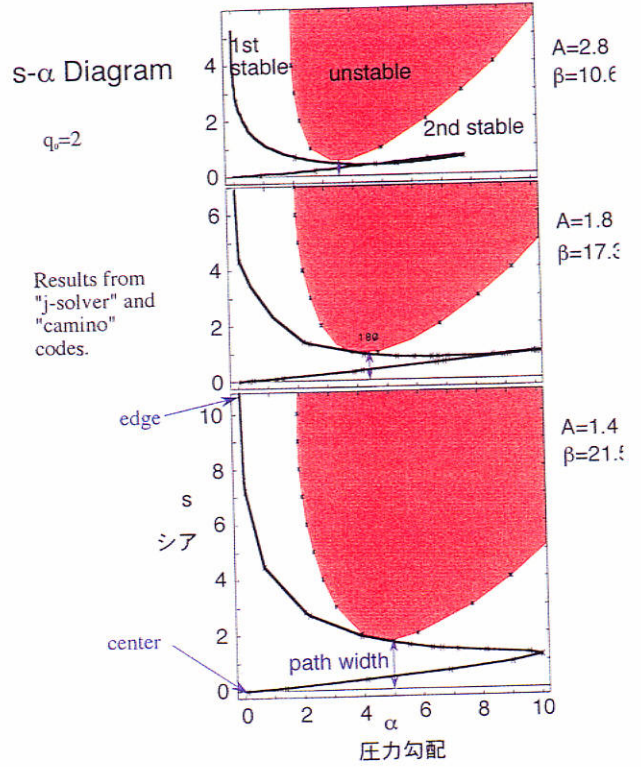
球状トラス(ST)

- 低アスペクト比トカマクはSpherical Torusとも呼ばれる。
- 高 β のSTでは悪い曲率側に絶対極小磁場ができるので、バルーニングモードの第二安定化がはかられる。
- 微小不安定性も安定化されるので異常拡散が抑えられる。



バルーニングモードの第二安定化

- 低アスペクト比によって、バルーニングモードの第二安定化領域に入りやすくなる。



核融合科学研究所

伊藤公孝

Summary and Discussion

National Institute for Fusion Science

Kimitaka Itoh

トカマクのディスラプションの様な終末的現象から、鋸歯状振動など周期的継続的な現象に至るまで、歴史的には多種多様な崩壊現象が観測されている。従来、その回避のために研究が求められていた。しかし、崩壊現象は、非平衡系の発展の極めて興味ある現象であって、今日的・将来的に豊かな物理が展開するだろう。

ここでこのシンポジウムでの提言をまとめてみたい。

普遍的様相 前に述べられた講演で理論-実験の双方から考察されたように、磁場閉じ込めプラズマのなかで発生する崩壊現象は極めて多様でありながら、同時に普遍的様相を示している。崩壊現象を特徴づける時間空間発展には、

- (1) 巨視的プラズマ・パラメタのゆるやかなゆっくりした変化
- (2) しばしばプリカーサーと呼ばれる変形・活動の発達
- (3) 爆発的な変形の発展（トリガー現象）と、構造の崩壊
- (4) 揺動の終結と、巨視的プラズマ・パラメタのゆるやかな発展

という相があることとして統一的に捉える事が、このシンポジウムのひとつの提言である。観測と把握の総覧を表に示す。

遷移現象 特に物理としてチャレンジングなところは、爆発的な変形と、崩壊の始まりにあらう。対称性のよい状態から、プリカーサーや爆発的な発達によって対称性が失われる。不安定性の発達という観点から研究が進められてきた。従来、線形理論を用いて多数の安定性解析が行われてきた。しかし、「トリガー現象」と呼ばれるように、プリカーサーなど変形の成長率が、極めて短時間に急増することが崩壊現象の特徴である。ごく短時間には、巨視的分布・構造の変化は微小であり、成長率の変化も微小なものしか予測されないのであるが、実際は、大規模な成長率変化が起きている。線形成長率の詳細な計算の必要な場合もあらうが、崩壊現象のように重要な問題には適切な研究方向ではない。このシンポジウムでは、新しい研究指針として、径方向構造（勾配等）と変形・揺動構造を総合した、プラズマの遷移現象として捉える考えを提示している。崩壊現象をヒステリシスを伴い得る分岐・遷移現象として把握すべきではなからうか。非線形シミュレーションにおいても、乱流の非線形励起が記述されはじめています。

理論的には、自己維持乱流を始め、非線形不安定性が存在し、乱流-乱流遷移が予言されている。微少な平衡状態の差違が、乱流状態の分岐を生んで、大規模な巨視的ダイナミクスを発生させる。多種の（準）平衡状態の間の遷移として把握が進めば、崩壊が起きる特異点の近傍での発生確率の把握も可能にならう。

実験では、高精度・高分解計測が実施されるに至り、詳細なデータが得られている。それに基づいて、新しい描像を見せている。ヒステリシス現象も観測され、爆発的な増大の定量的把握の可能性が高まっている。

ここで例を取ったトロイダル・プラズマの崩壊現象は、実験室に固有の現象でなく、宇宙全体の現象に普遍的な意義をもった問題と思われる。例えば、磁気嵐が「突如」発生する例がしばしば見られる。太陽フレアの磁気再結合でも、突発性は重要な要因である。降着円盤にもバーストが起きている。これらを一端とする多くの現象でも、振動モードが中立安定な状態を徐々に経て成長を始めるというより、むしろ成長率の急変が理解の鍵であろう。このシンポジウムで提言する「遷移現象と崩壊現象」としての描像はより広い対象について有効であり、今後の普遍的理解のための一つの方法論となろう。

Events of Bifurcation-Collapse Type

Name	Observed Response	Time Scale	Explosive Mode	Precursor Mode	Note
Sawtooth	$T_e n_e$ $\Delta q \sim 0.05$	$<100\mu\text{s}$	$m/n = 1/1$ etc.(?)	$m/n = 1/1$	No full-reconnection $q(0) < 1$
Partial Sawtooth	as above	←	←	←	←
Disruption (Thermal Quench)	T_e	$10 - 100\mu\text{s}$	$m/n = 1/1$ "erosion"	$m/n = 2/1$ 3/1 etc.	Density limit, $q = 2, 3$
High- β Collapse (tokamak)	$T_e (T_i)$	$<100\mu\text{s}$	$n \gg 1$ Ballooning	$m/n = 1/1$ etc.	$\beta \sim \beta_c^{MHD}$
Internal Collapse (Heliotron)	T_e	$<100\mu\text{s}$	$m/n = 2/1$ Interchange	$m/n = 2/1$	
ELMs (Type-I)	$T_e T_i n_e$	$10 - 100\mu\text{s}$	$n \gg 1$	---	$\alpha \sim \alpha_c^{MHD}$
X-Event	$\chi_i T_i$	$<100\mu\text{s}$	---	---	High- T_i mode
BLM	∇T_e	$<100\mu\text{s}$	$m/n = 3/1$ Infernal?	---	High- β_p mode
MTE	∇V_φ	$<100\mu\text{s}$	$n \gg 1$	---	Prohibits VH-mode
CHS Burst	$\phi(r)$	few $100\mu\text{s}$	$m/n = 1/1$	$m/n = 2/1$	NBI injection
Spikes in Loop-V	$J(r)$		$n = 1$ kink?		e.g. $q = 7, 6, 5$
IRE	ℓ_i				Low-Aspect-Ratio tokamak

Abbreviations: ELMs (edge localized modes), MTE (momentum transfer events), BLM (barrier localized mode), IRE (internal reconnection events).

シンポジウム

Collapse, Terminating Eventsの物理

まとめと討論

核融合科学研究所

伊藤公孝

1. 崩壊現象：極めて普遍的

2. 物理現象としてのミステリー

速いタイム・スケール（トリガー現象）

微小パラメタ変化と突発性
（なぜその直前に起きないのか）

3. 物理学的インパクト

非線形現象

ヒステリシス

多種モードの協同現象

遷移現象

今回の発表

関子

長山

伊藤（早）

4. 核融合へのインパクト

改善閉じ込め状態の限界

井手

5. より広範囲な普遍的現象

磁気圏のバースト

太陽フレア

X線バースター（中性子星）

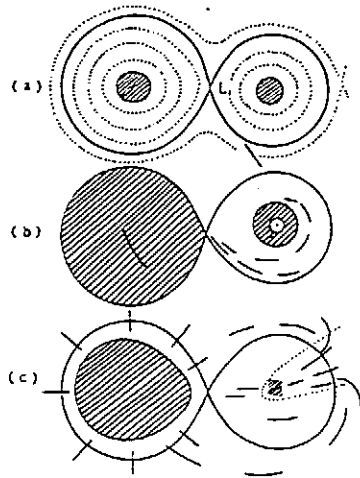


図6.2 近接連星系における質量降着.

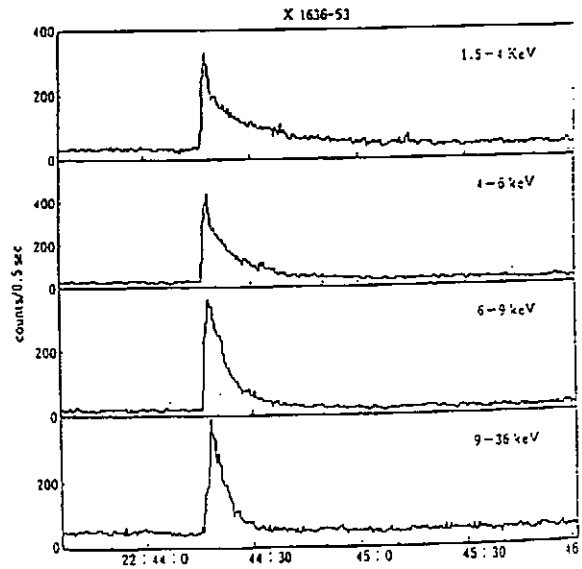


図6.7 X線バーストの例.

現代の宇宙論
早川源男・佐藤文雄・松本敏彦編
名古屋大学出版会

物理学的インパクト

非線形現象

ヒステリシス

多種モードの協同現象

関子

長山

遷移現象

伊藤（早）

改善閉じ込め状態の限界

井手

非線形非平衡系の物理を開く

Einstein - Kubo - Wilson -

プラズマ物理

NIFS-MEMO シリーズ出版リスト
(Recent Issues of NIFS-MEMO Series)

- NIFS-MEMO-1 都築哲哉、東井和夫、松浦清剛、「パソコンによる JIPP T-IIU プラズマの平衡位置フィードバック制御」1991年4月
T.Tsuzuki, K.Toi and K.Matsuura, "Feedback Control of Plasma Equilibrium with Control System Aided by Personal Computer on the JIPP T-II Tokamak"; Apr.1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-2 久保田雄輔、大林治夫、宮原 昭、大野和子、中村光一、堀井憲爾、
「環境磁界の研究 (I) 三次元積分磁束計の開発」1991年7月
Y.Kubota, H.Obayashi, A.Miyahara, K.Ohno, K.Nakamura and K.Horii,
"Development of Three-Dimensional Compact Magnetic Dosimeter for Environmental Magnetic Field Monitoring", July,1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-3 「核融合科学研究所技術研究会; 1991年3月19、20日 土岐文化プラザ」
1991年8月
"Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories; Mar. 19, 20, 1991"
Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-4 「プラズマ中におけるカオス現象」1991年8月
"Chaotic Phenomena in Plasmas ", Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-5 山崎耕造、「ファジー論理のトロイダルプラズマ制御への応用」
1992年2月 "Fuzzy Logic Application to Troidal Plasma Control ",
Feb. 1992 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-6 平成3年度 核融合科学研究所 支援調査共同研究報告書 「大出力
マイクロ波源の開発に関する調査研究」1992年4月
"Development of High Power Microwave Source ", Apr. 1992
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-7 平成3年度 核融合科学研究所 共同研究(調査支援研究)研究成果
報告書
「プラズマにおけるカオス現象」1992年11月
"Chaotic Phenomena in Plasma, II", Nov. 1992 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-8 NIFSシンポジウム報告書「核融合が材料照射用強力中性子源の設計
と大学の役割」1993年1月
"Design of Intense Neutron Source for Fusion Material Study and the Role of
Universities". Jan. 1993 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-9 平成2、3、4年度 核融合科学研究所共同研究研究会研究成果報告書
「開放磁場における電位と輸送機構」1993年4月
(Ed.) K. Yatsu and T. Hatori "Potential Formation and Transport in Open Field Line
Systems", Apr. 1993
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-10 伊藤公孝、「人口太陽は燃えるか -核融合研究最前線-原子力オープン・
スクール講演」1993年5月
K. Itoh, Reports of NIFS Collaboration Workshop from 1990 to 1992 at National
Institute for Fusion Science.
"At the Front of Fusion Research -Introductory Lecture Open to Public-",
May 1993 (In Japanese)

- NIFS-MEMO-11 (Ed.) T. Kato
"Atomic Physics and Radiation in Divertor and/or Disruption Plasmas",
Aug. 1993 (In English)
- NIFS-MEMO-12 平成4年度 核融合科学研究所 共同研究 (調査支援研究) 研究成果報告書
「プラズマのカオス現象 (まとめ)」1993年10月
"Chaotic Phenomena in Plasma, III", Oct. 1993
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-13 久保田雄輔、野田信明、相良明男、井上徳之、赤石憲也、本島修、
「プラズマ対向材料の開発・研究用高熱負荷試験装置ACT」1994年3月
"Electron Beam Irradiation Test Facility for Research and Development of Plasma
Facing Components", Mar. 1994
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-14 「平成5年度核融合科学研究所技術研究会
日時：1994年3月23日-24日
場所：セラトピア上岐、上岐商工会議所」1994年7月
"Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories
by Department of Engineering and Technical Services", July 1994
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-15 S.-I. Itoh, K. Itoh, G. Soltwisch, K. H. Finken,
"Study on Sawtooth and Transport
-- A Report of Japan-TEXTOR Collaboration --". Jan. 1995
(In English)
- NIFS-MEMO-16 久保田 雄輔、野田信明、相良明男、井上徳之、赤石憲也、山本純也、本島修
「LHD用ダイバータ板の開発・研究各種カーボン・銅接合材の熱負荷試験」
Y. Kubota, N. Noda, A. Sagara, N. Inoue, K. Akaishi, J. Yamamoto, O. Motojima,
"Research and Development of Divertor Plates for LHD (High Heat Flux Tests of Various
Kinds of Materials)", Apr. 1995 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-17 江尻 品,
「LHDにおける窓の熱設計」
A. Ejiri.
"Calculation of the Heat Transfer in the Windows of the Large Helical Device"
Nov. 1995 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-18 田辺哲朗、森田健治 編集
核融合科学研究所共同研究
「プラズマと壁との相互作用に関する研究会」
核融合科学研究所、平成7年9月12日-9月13日
(Eds.) T. Tanabe and K. Morita
"Proceedings of the Symposium on Plasma-Materials Interaction"
NIFS, Sep. 12-13, 1995,
Dec. 1995 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-19 K. Itoh (ed.),
Study on Sawtooth and Transport in Part of Japan-TEXTOR Collaboration 1995; Feb. 1996
- NIFS-MEMO-20 編集責任、核融合科学研究所、太刀川恭治、山本純也、
「核融合科学研究所共同研究、核融合炉用先進超伝導導体、研究調査報告書 I
Nb₃Sn系超伝導導体」

Editors: K. Tachikawa and J. Yamamoto,
"Studies on Advanced Superconductors for Fusion Device"
Part 1 - Present Status of Nb₃Sn Conductors-", Mar. 1996 (in Japanese)

- NIFS-MEMO-21 飯吉厚夫、藤原正巳、岡本正雄、大薮修義、金子修、笹尾眞實子、須藤滋、菅野龍太郎、武藤敬、村上定義、竹入康彦、富田幸博、山崎耕造
「LHDにおけるD-³He核融合の検討」
A. Iiyoshi, M. Fujiwara, M. Okamoto, N. Ohyabu, O. Kaneko, M. Sasao, S. Sudo, R. Kanno, T. Mutoh, S. Murakami, Y. Takeiri, Y. Tomita and K. Yamazaki,
"Studies on D - ³He Fusion in LHD", Mar. 1996 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-22 編集責任、核融合科学研究所、太刀川恭治、山本純也、三戸利行
「核融合科学研究所共同研究、核融合炉用先進超伝導導体、研究調査報告書 2
先進金属系超伝導導体」
Editors: K. Tachikawa, J. Yamamoto and T. Mito,
"Studies on Advanced Superconductors for Fusion Device"
Part 2 - Metallic Superconductors other than Nb₃Sn -", Mar. 1997 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-23 K. Itoh (ed.), S.-I. Itoh, U. Stroth, T. Iwasaki, M. Yagi and A. Fukuyama,
"Discussion Record of the Workshop on Nonlocal Transport"
June 1997
- NIFS-MEMO-24 Collapse, Terminating Eventsの物理
日本物理学会 シンポジウム
第52回年会 1997.3.29
"Physics of Collapse and Terminating Events" (in Japanese)
July 1997