

JAERI-M
87-004

JT-60ダイバータ配位プラズマにおける
キンク不安定性

1987年2月

小関 隆久・関 省吾・二宮 博正
安積 正史

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 粋高野高速印刷

J T - 60 ダイバータ配位プラズマにおけるキンク不安定性

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

小関 隆久・関 省吾・二宮 博正
安積 正史

(1987年1月14日受理)

J T - 60は、トーラスの外側にポロイダルダイバータを持った大型トカマク装置である。ダイバータ配位では、X点があるため、プラズマの表面で大きなシアーが形成される。このシアーによるn = 1 キンク・モードの安定化効果を、線形理想MHD安定性解析コードERATO-Jを用いて、数値的に解析し、以下の結果を得た。

- 1) ダイバータ配位プラズマでは、シアーのため変位がより表面に局在し、成長率が減少する。
- 2) 低 β ($\beta_p \lesssim 0.5$) プラズマでは、ダイバータ配位の方が安定領域が広い。しかし、高 β になるにつれて徐々に差がなくなる ($\beta_p \gtrsim 1.0$ では差がない)。
- 3) 高 β においても、ダイバータ配位において、成長率の減少が見られるが、限界 β 値に対しては、リミタ配位と殆んど差がない。

Kink Instability of the Divertor Configuration in JT-60

Takahisa OZEKI, Shogo SEKI, Hiromasa NINOMIYA
and Masafumi AZUMI

Department of Large Tokamak Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 14, 1987)

The large tokamak device JT-60 has a poloidal divertor with a stagnation point in the outerside of torus. The divertor configuration has a large shear near the plasma surface by the effect of X-point. Therefore kink modes are expected to be stabilized by this shear.

In this report, characteristics of $n = 1$ free boundary kink instability for the divertor configuration plasma are numerically analyzed by using the ideal MHD stability code ERATO-J.

The following results were obtained;

- 1) The kink instability displacements in divertor configuration are localized near the plasma surface and the growth rate is reduced by the shear.
- 2) The stability window in a divertor configuration with low β ($\beta_p \lesssim 0.5$) is wider than that in a limiter configuration, but the difference becomes small as the beta increases ($\beta_p \gtrsim 1.0$).
- 3) In high β , the growth rate in a divertor configuration is smaller than that in a limiter configuration, but the divertor configuration plasma has the almost same critical beta value as the limiter configuration plasma has.

Keywords: Tokamak, JT-60, Kink Instability, Divertor Configuration, X-point, ERATO-J, Ideal MHD Stability

目 次

1. 目 的.....	1
2. 計算の概要.....	3
2.1 MHD平衡データの作成.....	3
2.2 MHD不安定性の解析.....	3
3. 計算結果.....	6
3.1 キンク不安定性に対するダイバータ効果.....	6
3.2 β_p , ℓ_i , q_s に対する安定領域.....	6
3.3 ベータ限界値に対するダイバータ効果.....	7
4. 検討とまとめ.....	18
謝 辞.....	20
参考文献.....	20
付 錄.....	21

Contents

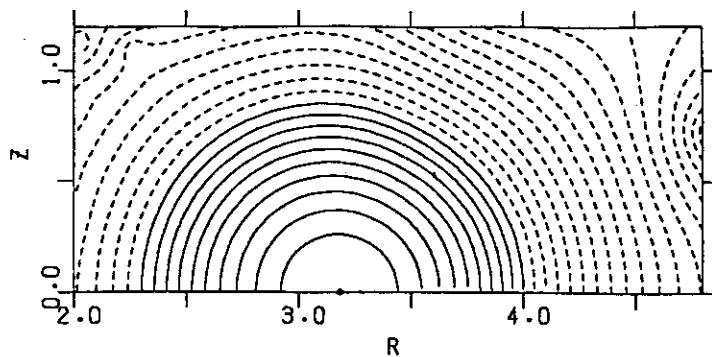
1. Introduction	1
2. Outline of Shimulation	3
2.1 Making the MHD equilibrium data	3
2.2 Analysis of the MHD instability	3
3. Numerical Results	6
3.1 Effect of divertor configuration on external kink	6
3.2 Stability region for β_p , ℓ_i and q_s	6
3.3 Effect of divertor configuration on critical beta	7
4. Discussion and Conclusion	18
Acknowledgements	20
References	20
Appendix	21

1. 目的

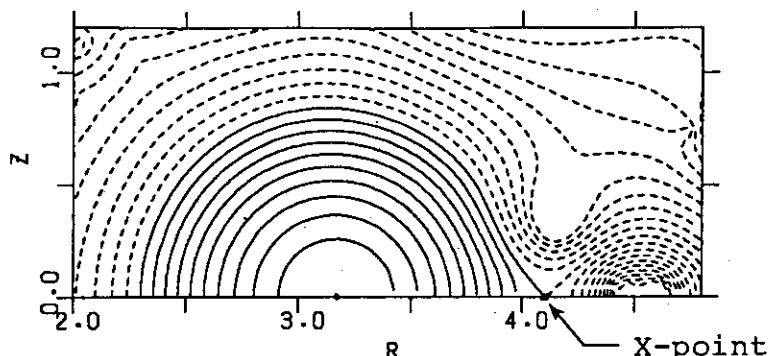
臨界プラズマ試験装置 JT-60は、トーラスの外側に磁気リミタコイルを持ち、ダイバータ配位プラズマとリミタ配位プラズマを作れる大型トカマク装置である。ダイバータ配位では、トーラス外側に Stagnation point (X点) を持つおり、プラズマ表面で安全係数 $q \left(\equiv \frac{RB_T}{2\pi} \oint \frac{d\ell}{B_p R^2} \right)$ が無限大になる。このため、プラズマ表面付近のシアーアー $s \left(\equiv \frac{r}{q} \frac{dq}{dr} \right)$ は、リミタ配位と異なり、極端に大きくなる。図1に典型的なプラズマにおけるシアーアー s の小半径に対する分布を示す。ここで \tilde{s} は、プラズマ中心を0、プラズマ表面を1となる様に規格化したポロイダル磁束関数である。リミタ配位では、シアーアーが中心から表面に向って、穏やかに単調増加しているのに対し、ダイバータ配位では、表面付近で急激にシアーアーが増加していることがわかる。

このプラズマ表面で大きいシアーアーは、キンク不安定性に対する安定化効果があると期待できる。そこで、線形理想MHD安定性解析コード ERATO-J¹⁾ を用いて、 $n = 1$ キンク不安定性に対する以下の点について数値的に解析した。

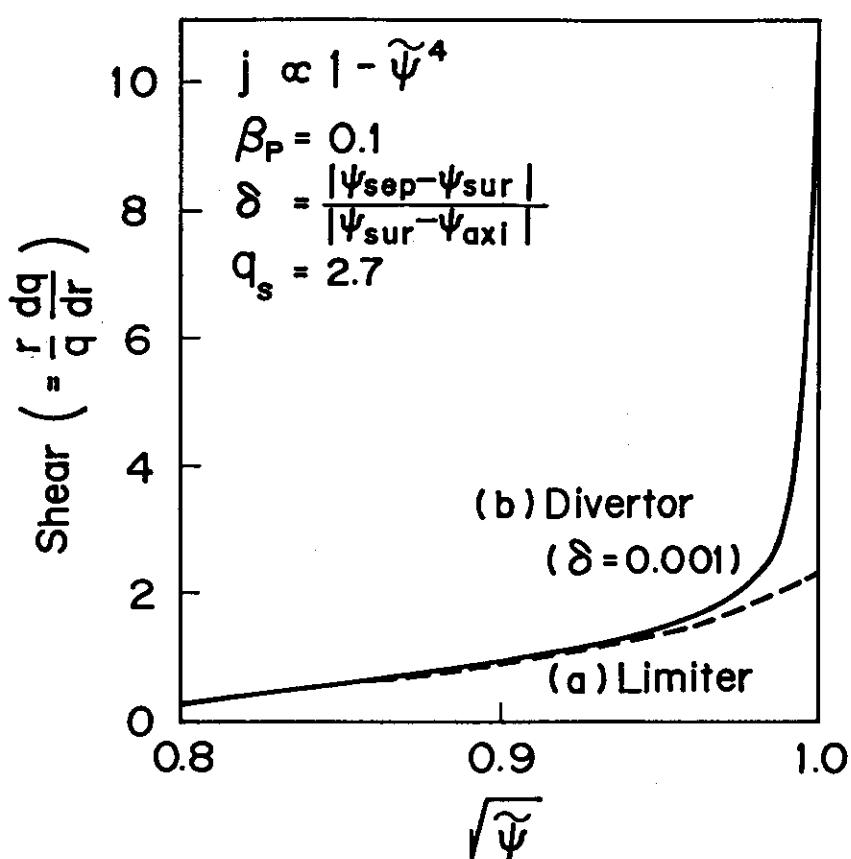
- 1) キンク不安定性に対する、ダイバータ配位の安定化効果
- 2) β_p, ℓ_i, q_s などのパラメータに対する安定領域
- 3) β 限界に対する、ダイバータ配位の効果



(a) LIMITER CONFIGURATION



(b) DIVERTOR CONFIGURATION

図1 リミタ配位及びダイバータ配位におけるシアーの $\sqrt{\tilde{\psi}}$ に対する分布

2. 計 算 の 概 要

本計算は、MHD平衡計算コードで平衡状態のプラズマデータを作り、その値に対して線形理想MHD安定性解析コードERATO-Jを用いて、不安定性を調べた。

2.1 MHD平衡データの作成

ポロイダル断面をR-Z面とする円柱座標系で、与えられた β_p (ポロイダルベータ値) , q_s (プラズマ表面の安定係数) , q_0 (プラズマ磁気軸上の安定係数) , ℓ_i (規格化内部インダクタンス)に対する、プラズマ平衡データ (磁束関数 ψ など) を計算する。計算精度を上げるために、数値計算の格子点は、R方向513点、Z方向257点とした。これは、実機寸法で、5.5 mm × 4.6 mmの格子に対応している。

以下の計算では、トロイダル電流密度 j_φ として、次式の分布を用いる：

$$j_\varphi = -R \frac{dp}{d\psi} - \frac{1}{\mu_0 R} F \frac{dF}{d\psi}$$

$$\frac{dp}{d\psi} = \frac{j_0}{R_0} \beta_p (1 - \tilde{\psi}^{j_1})^{j_2}$$

$$F \frac{dF}{d\psi} = R_0^2 \left(\frac{1}{\beta_p} - 1 \right) \mu_0 \frac{dp}{d\psi}$$

ここで R_0 , β_p は、各々プラズマ中心の大半径、ポロイダルベータ値である。定数 j_0 , j_1 , j_2 は、 q_0 , q_s 及び規格化内部インダクタンス ℓ_i ($= \langle B_p^2 \rangle / B_p^2(a)$) から決める。また、 $\tilde{\psi} = (\psi - \psi_{axis}) / (\psi_{sur} - \psi_{axis})$ であり、 ψ_{sur} , ψ_{axis} は各プラズマ表面及び磁気軸の磁束関数である。

ダイバータ配位においては、X点におけるメトリック係数の特異性を避けるため、セパラトリックス磁気面 ($\psi = \psi_{sep}$) からポロイダルフラックス量で $\delta\psi_{sep}$ だけ内側の磁気面をプラズマ境界とした。ここで、

$$\delta\psi_{sep} = |\psi_{sur} - \psi_{sep}| = \delta \times |\psi_{sep} - \psi_{axis}|$$

である。ダイバータ配位では、プラズマ表面に近いほどシアーが大きくなるため、 $\delta\psi_{sep}$ の設定に注意を要する。以下の計算では、 $\delta = 0.001$ とし、その結果については次章で述べる。

2.2 MHD不安定性の解析

ERATO-J¹⁾は、R-Z面で作られた平衡データを磁力線が直線となる座標系 (ρ , χ) に変換して不安定成長率及び固有関数を求めていた。ここで $\rho = \sqrt{\tilde{\psi}}$ 。

ダイバータ配位におけるキンク不安定性の計算では、プラズマ表面での摂動が大きくなると予想されるため、表面付近に mesh accumulation を掛ける必要がある。本論文では accumulation としては、ローレンツ分布をとる。即ち、

$$\frac{dr}{d\rho} = \frac{1}{1+c} \left\{ 1 + c \cdot \frac{f(\rho)}{\int_0^1 f(\rho) d\rho} \right\}$$

$$\text{ここで } f(\rho) = \frac{1}{w} \left\{ \left(\frac{\rho - \bar{\rho}}{w} \right)^2 + 1 \right\}$$

として、r 座標 ($0 \leq r \leq 1$) でグリッド点が等間隔となる様 ρ メッシュを設定する。ここで、 $\bar{\rho}$ 、w、c は、各々 accumulation を掛ける位置 ($\bar{\rho} = 0.0$ で磁気軸、 $\bar{\rho} = 1.0$ で表面)、幅、重みを表わす。

図2は、mesh accumulationを行った場合の二乗成長率の、(ρ, χ) 方向のグリッド数 (すなわち $N^2 = N_\rho^2 = N_\chi^2$) に対する依存性を示したものである。プラズマ表面付近のメッシュを細かくすることによって成長率が減少し、 \hat{r}^2 が直線に乗って来ることが示されている。また、図3に、 90×90 メッシュ及び 60×60 メッシュの格子点上の変位 ξ を $\sqrt{\tilde{\psi}}$ に対して示した。変位分布は、メッシュ数に依存せず、ほぼ同じ形をしており、固有関数は正しく求められていると考えられる。以上の結果から以下の計算では、わずかに過大評価となるが、特に断わらない限り 90×90 メッシュとし、 $\bar{\rho} = 1.0$ 、 $w = 0.1$ 、 $c = 1.0$ の mesh accumulation を用いる。

なお、ここで述べた自乗成長率 \hat{r}^2 は、ポロイダルアルフベニ速度 v_A 及びプラズマの主半径で規格化した値 ($\hat{r}^2 = r^2 / (v_A / R)^2$) で JT-60のパラメータでは、およそ $\hat{r} = 1$ のとき $r = 4.6 \times 10^6$ ($1/s$) となる。

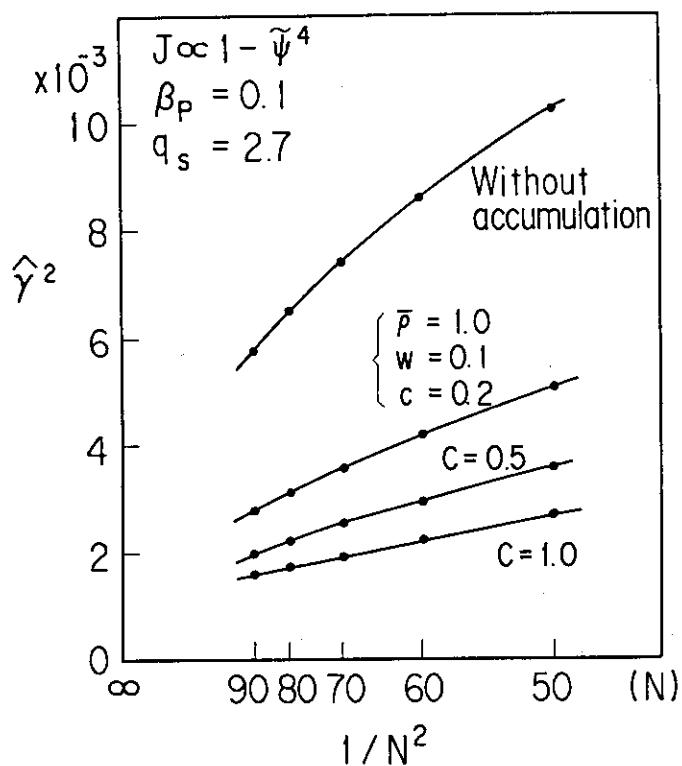


図2 ダイバータ配位におけるmesh accumulationに対する成長率の自乗収束性。 $\bar{\rho}$, w , c は半径方向のaccumulationを決めるパラメータで、各々位置、幅、重みを表わす。

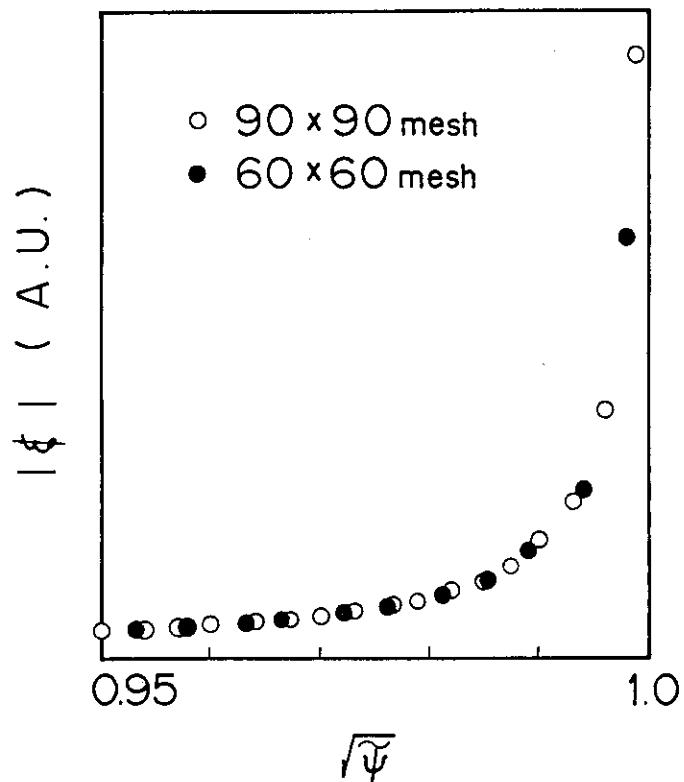


図3 ψ , χ 方向のメッシュ数が 90×90 と 60×60 の場合の計算について、小半径方向 $\sqrt{\tilde{\psi}}$ に対する格子点上の変位 $|\delta|$

3. 計 算 結 果

3.1 キンク不安定性に対するダイバータ効果

典型的なキンク不安定が起こる場合として、電流分布がフラット ($\ell_i = 0.7$) で、低ベータ ($\beta_p = 0.1$) の場合について、リミタ配位プラズマとダイバータ配位プラズマの比較を、プラズマ表面の安全係数 q_s が $2 \sim 3$ の範囲について行った。この計算では、 $q_s = 2.7$ で得られた平衡データを基に、 σ スケーリングを用いて q_s のスキャニングを行った。また、自乗成長率 $\hat{\gamma}^2 = 5 \times 10^{-5}$ を安定性判定の基準とした。

リミタ配位プラズマ及びダイバータ配位プラズマの q_s に対する自乗成長率の依存性を図4に示す。成長率は、ダイバータ配位では著しく減少し、かつ安定領域が拡大している事がわかる。ダイバータ、リミタの両配位について、 $q_s = 2.7$ のときの変位の2次元分布を図5に示す。 $q_s = 2.7$ であるため、いづれも $m = 3$ のモードが支配的である。リミタ配位では、中心付近の変位が小さく、プラズマ表面に向って徐々に大きくなり、円柱プラズマにおけるキンク不安定性と同様の変位パターンを示している。一方、ダイバータ配位では、極く表面に変位が局在し、プラズマ内部の変位は相対的に小さい。また、変位は磁気面に沿っており、磁気面を横切る変位が抑制されている事がわかる。これは、副磁気リミタコイルにより、X点付近で強い磁場勾配があるためと思われる。同様の効果は、既に位置不安定性に対する変位ベクトルにおいても示めされている²⁾。位置不安定性の場合には、この安定化効果がX点近傍に限られていたのに対し、キンク不安定性の場合には、磁力線に沿って平均化される為、プラズマ断面全体にわたって安定化効果が現われる。

図6はダイバータ、リミタ両配位に対するキンクモードの変位 $|\psi|$ の小半径方向 $\sqrt{\psi}$ 分布を示す。変位 $|\psi|$ は、ダイバータ配位の方が、表面より内側に向くにつれて急激に減少しており、シアーの効果が大きく働いていることがわかる。

ダイバータ配位においてシアーの効果を正しく評価するには、セパラトリックス磁気面とプラズマ表面の間隔が問題となる。図7に、 $\delta (= \delta\psi_{sep}/|\psi_{sep} - \psi_{axis}|)$ に対する不安定性の自乗成長率 $\hat{\gamma}^2$ の依存性を示す。 $\delta\psi_{sep}$ が大きい場合 ($\delta = 0.1$ で、X点付近のセパラトリックス面とプラズマ表面の間隔は 14 cm) には、ほぼリミタ配位に近い成長率になるが、 $\delta\psi_{sep}$ を小さくするにつれて成長率が下がり、 $\delta = 0.001$ (X点付近のセパラトリックス面とプラズマ表面の間隔は約 1 cm) で一定値に収束している事がわかる。この事は、この計算で用いた $\delta = 0.001$ が妥当な値である事を示している。

3.2 β_p , ℓ_i , q_s に対する安定領域

ポロイダルベータ値 β_p 、規格化内部インダクタンス ℓ_i 、表面の安全係数 q_s を変えた場合の、ダイバータ配位の効果によるキンク不安定領域の変化を以下に示す。はじめに、低ベータ ($\beta_p = 0.1$) の場合で、 $\ell_i = 0.8, 0.9, 1.0$ に対する自乗成長率 $\hat{\gamma}^2$ の q_s 依存性を $q_0 = 1.05$ に固定して求めた結果を図8に示す。 ℓ_i を減少 (電流分布の平坦化) すると、電流駆動項が増え成長率が増加する。しかし、いづれもダイバータ配位の方が成長率が小さく、安定領域も広い。次に、ベータ値を上げた

($\beta_p = 0.5$) 場合の結果を図 9 に示す。 β_p 値の増加によって圧力駆動項が増え、全体的に成長率が増加するが、 $\beta_p = 0.1$ の場合と同様に、ダイバータ配位の方が成長率が小さい。ただし、両配位の安定領域の差は、小さくなっている。

これらの結果を $q_s - \ell_i$ 平面についてまとめたものが図 10 である。ダイバータ・リミタ両配位において、 β 値の増加によって不安定領域が増加する。ダイバータ配位の方が、リミタ配位に対して不安定領域が、 $m=3, 4$ のいづれにおいても小さいが、 β 値の上昇によってその差が小さくなっていることがわかる。ここで得られた結果は、円柱プラズマモデルから得られた不安定領域（付録参照）よりやや小さいが、定性的にはほぼ同様な結果である。

さらにベータ値を上げる ($\beta_p = 1.0$) と、図 11 に示す様に全体的に低 β に比べて成長率が大きくなり、リミタ配位とダイバータ配位の安定領域の差がなくなる。 $\ell_i = 0.8$ (平坦な電流分布) では、リミタ配位・ダイバータ配位ともに、 $q_s = 2.0 \sim 4.0$ で常に不安定 (ダイバータ配位では、 $q_s = 3 \sim 3.2$ で成長率が小さくなるが、不安定) である。ただし、このときでも、ダイバータ配位の方が成長率が低い。

3.3 ベータ限界値に対するダイバータ効果

ベータ値を前節よりさらに高くして、限界ベータに達したとき、ダイバータ配位の効果があるか調べた。ここでは典型的な圧力分布 $P(\psi)$ 、電流分布 $J(\psi)$ について計算し、限界ベータ値に対する圧力分布の最適化は、³⁾ 行っていない。図 12 は、 $q_s = 3.2$ 、 $q_0 = 1.05$ 、 $\ell_i \approx 0.90$ のプラズマに対する成長率のベータ値依存性を示す。図より、ダイバータ配位の方が、不安定成長率の減少は見られるが、成長率のベータ値に対する差はないことがわかる。これは、 $n = \infty$ バルーニング不安定性による限界ベータと定性的に一致する。限界ベータにより不安定を起したときの変位の 2 次元分布を図 13 に示す。リミタ配位では、低 β の変位とは異なり、圧力駆動項の効果で、プラズマ内部まで大きな対流が起っていることがわかる。これに対して、ダイバータ配位では、低ベータの時よりもプラズマ内部の変位が大きくなるが、やはり変位はプラズマ表面に局在し磁気面に沿った動きをしている。

次に電流分布を変えた場合の限界ベータを調べた。図 14 は、 q_s 、 q_0 を 3.2 と 1.05 に固定し、規格化内部インダクタンス ℓ_i を変えた場合の限界ベータ値を示している。ダイバータ配位とリミタ配位の限界ベータの差は、わずかであるが、両配位において ℓ_i が減少 (電流分布の平坦化) するにつれて限界が下がる傾向がある。これは Kink-Ballooning 不安定性においては、電流駆動項と圧力駆動項の両方が不安定要因となるが、 ℓ_i が減少するにつれて、圧力駆動項よりも電流駆動項の効果が、より多くなっているためである。 $\ell_i \approx 1.0$ 付近のベータ限界の高い領域で、Troyon 係数 R ($= \beta_c / (I_p \times 10^{-6} / a B_t)$) = 2.6 が得られる。

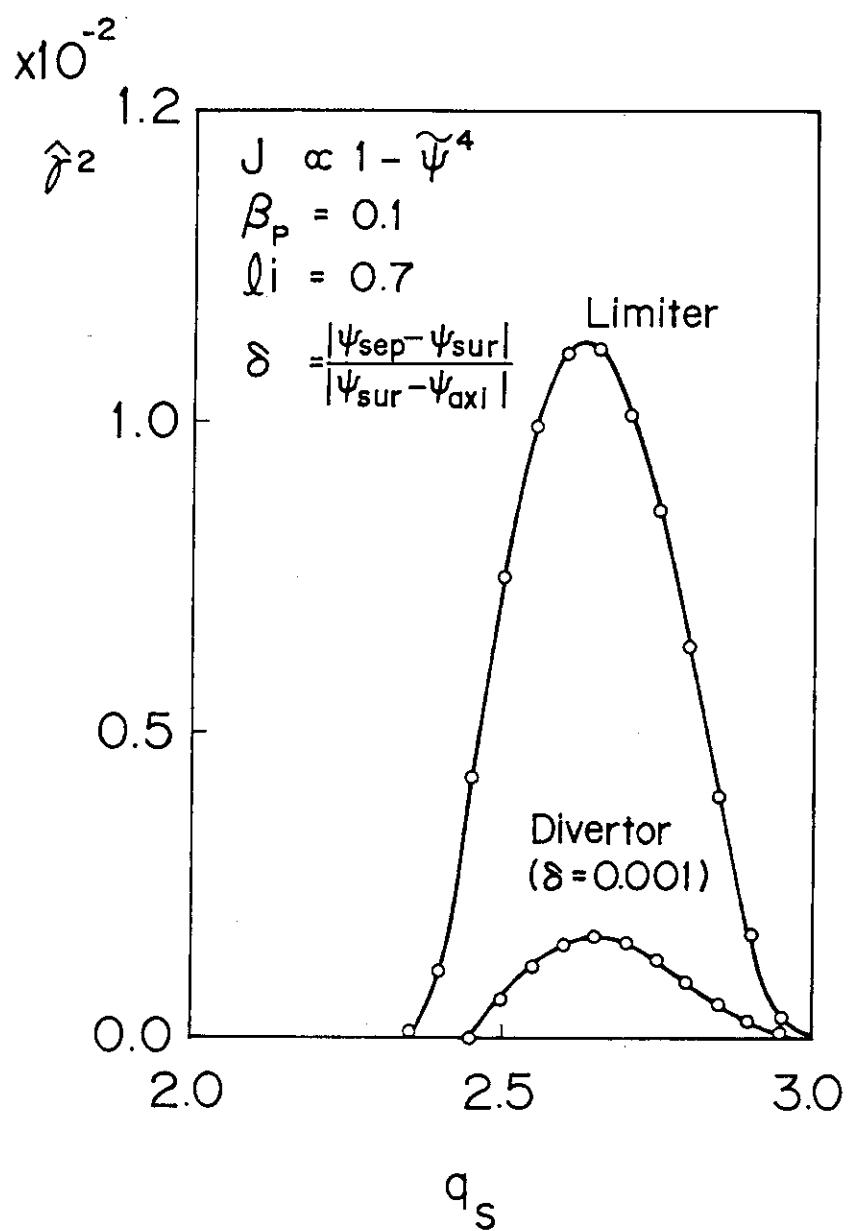
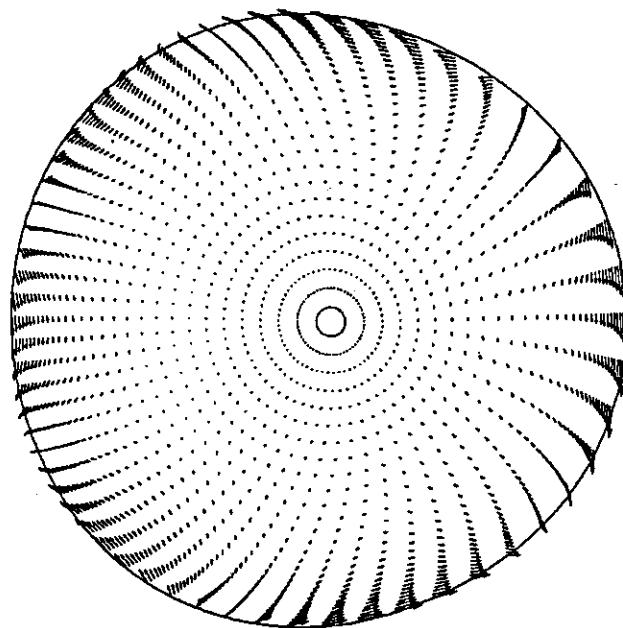
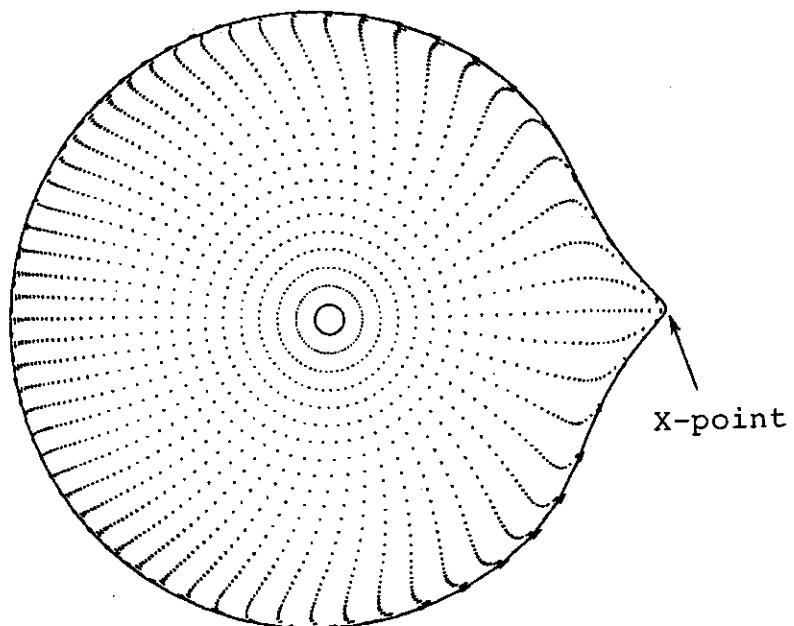


図4 リミタ配位及びダイバータ配位プラズマの
 q_s に対する不安定成長率

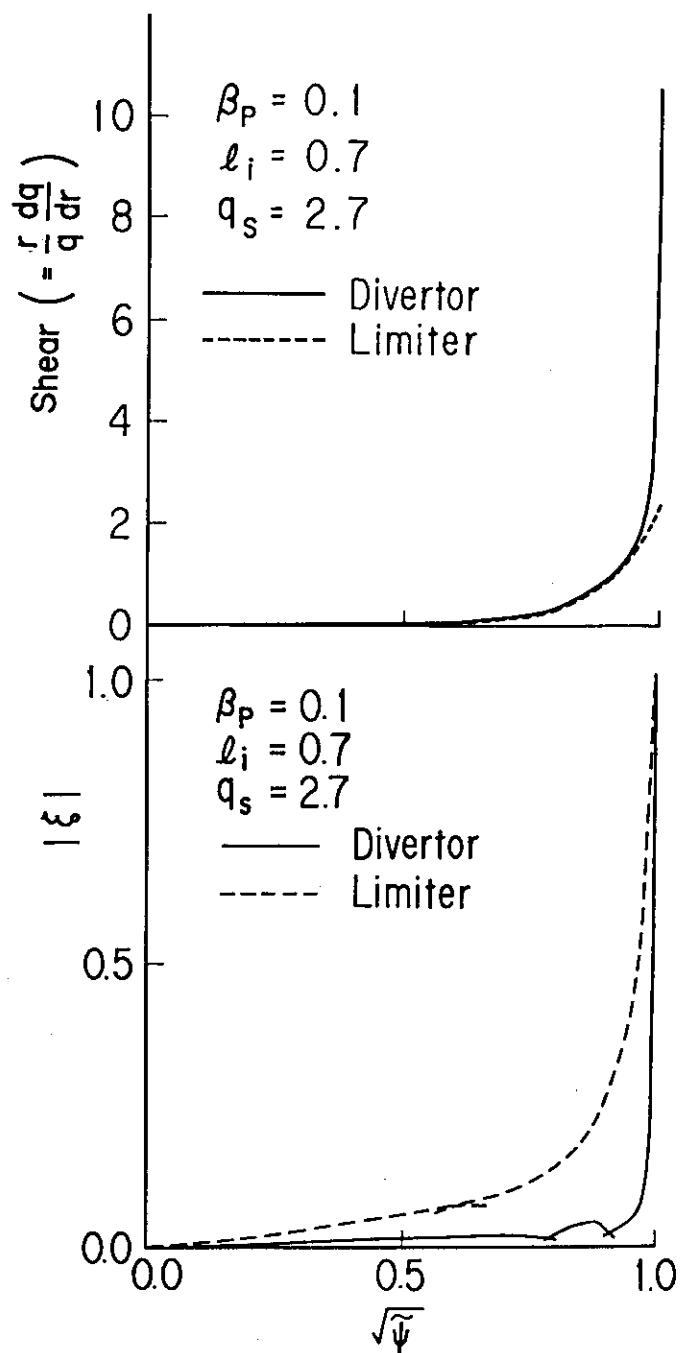


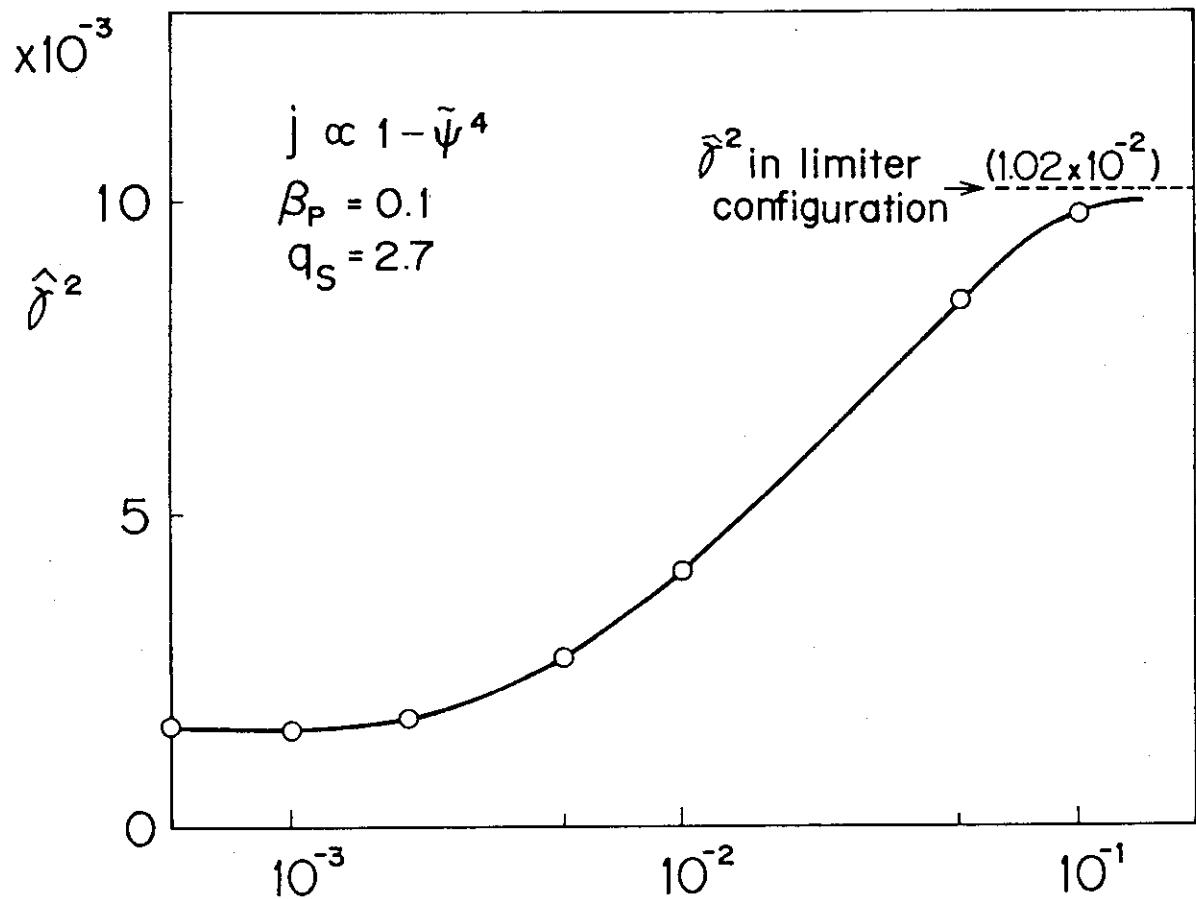
(a) LIMITER CONFIGURATION PLASMA
 $N = 1.00$ QAXIS = 1.9545 QSURF = 2.7026
 $A = 3.706$ BETAP = 0.098



(b) DIVERTOR CONFIGURATION PLASMA
 $N = 1.00$ QAXIS = 1.8061 QSURF = 2.6975
 $A = 3.559$ BETAP = 0.113

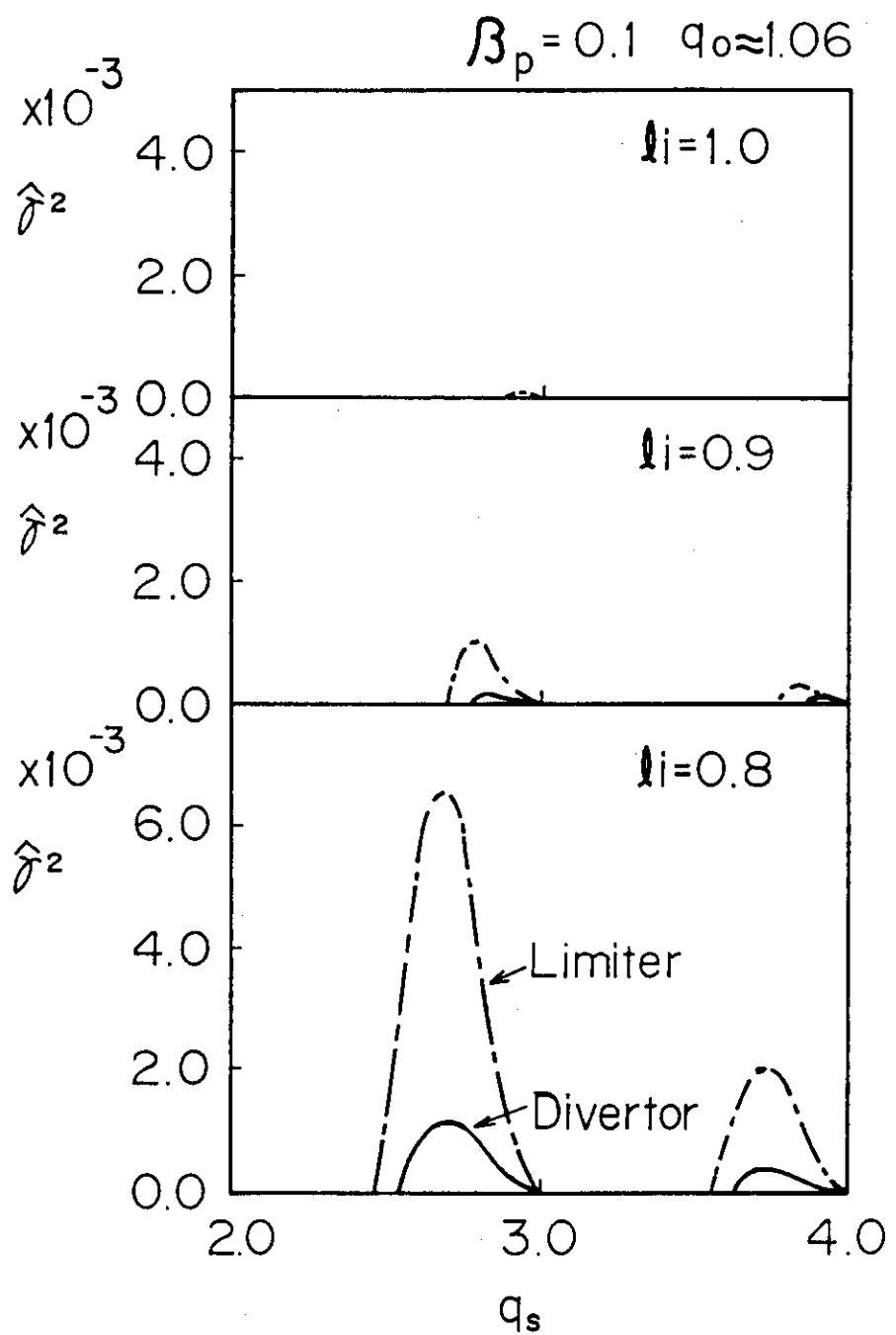
図5 リミタ配位プラズマ(図a)及びダイバータ配位プラズマ(図b)におけるキンクモード変位図($q_s = 2.7$)

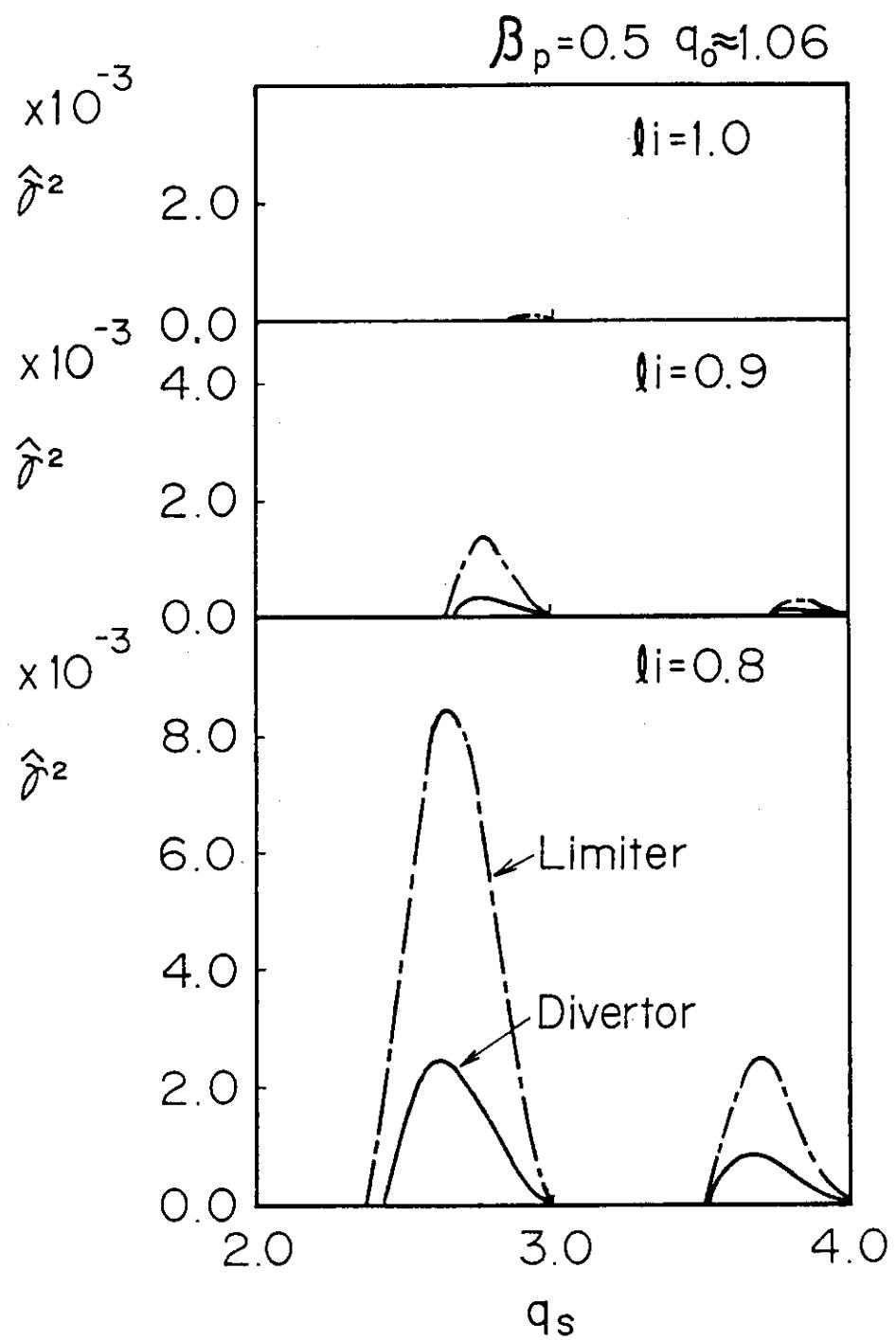
図6 小半径方向に対するシアー及び変位 $|\xi|$

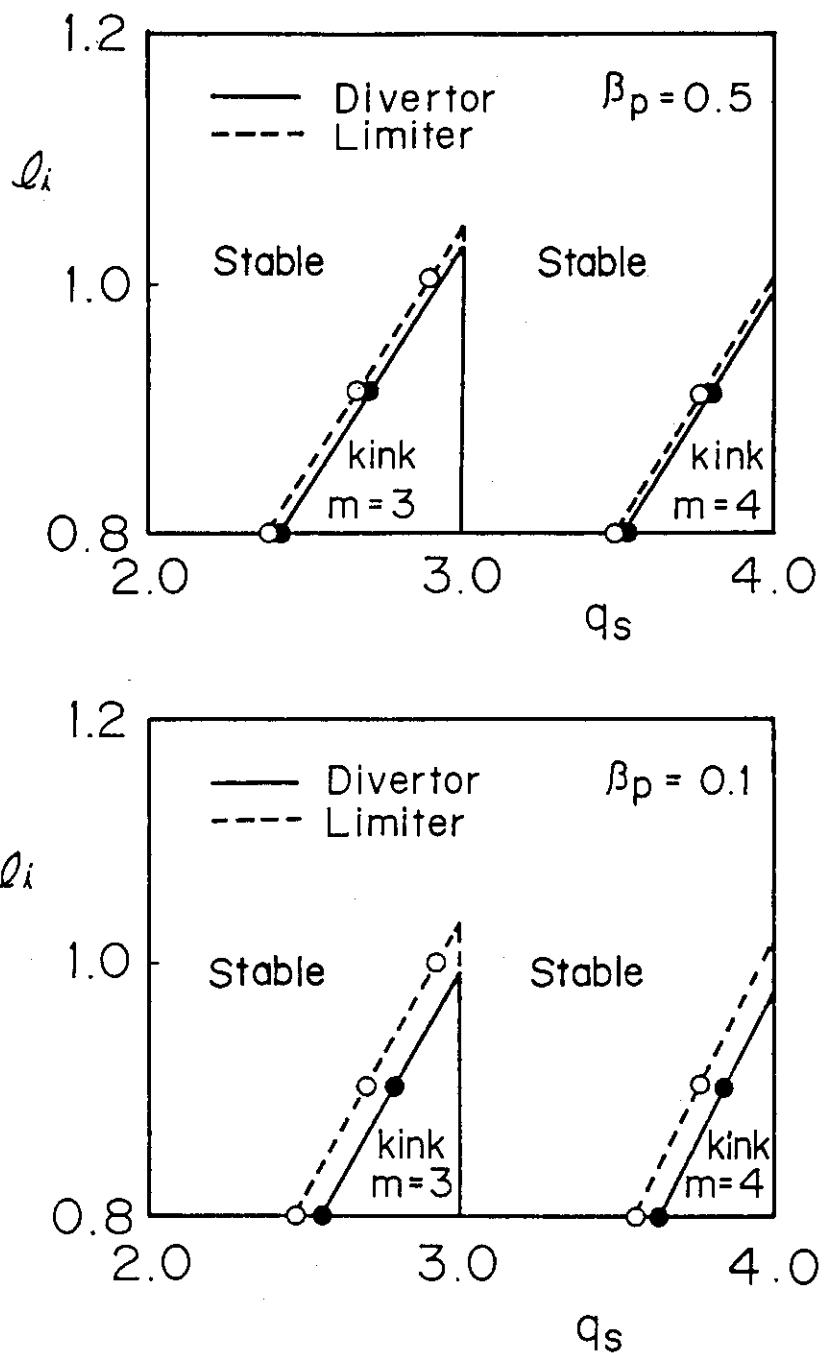


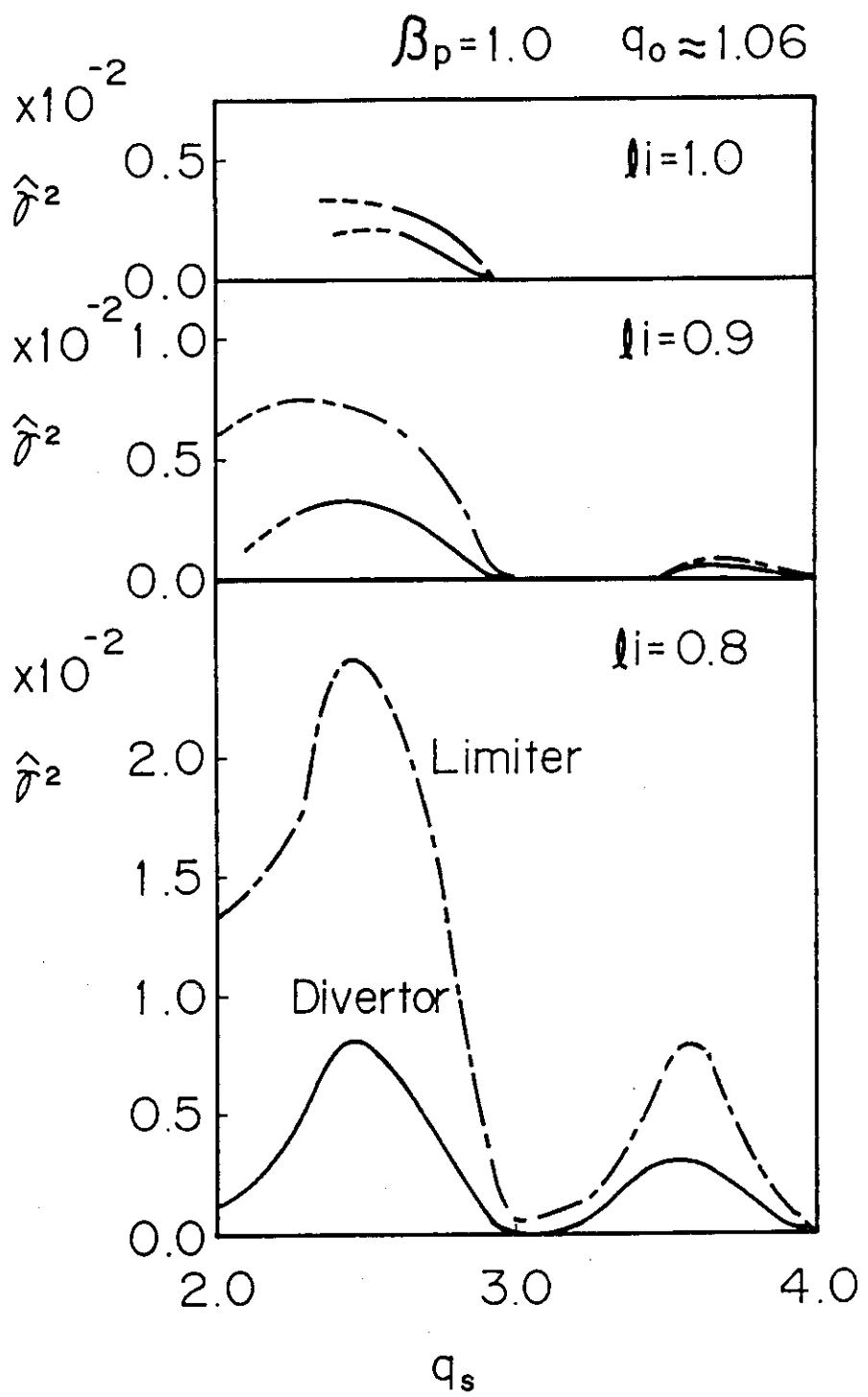
$$\delta = \left| \frac{\psi_{\text{sep}} - \psi_{\text{sur}}}{\psi_{\text{sur}} - \psi_{\text{axi}}} \right|$$

図 7 δ に対する不安定成長率

図8 $\beta_p = 0.1$ における q_s, ℓ_i に対する不安定成長率

図9 $\beta_p = 0.5$ における q_s , ℓ_i に対する不安定成長率

図10 $q_s - l_i$ 平面での $m=3, 4$ キンク不安定領域

図 1 1 $\beta_p = 1.0$ における q_s, ℓ_i に対する不安定成長率

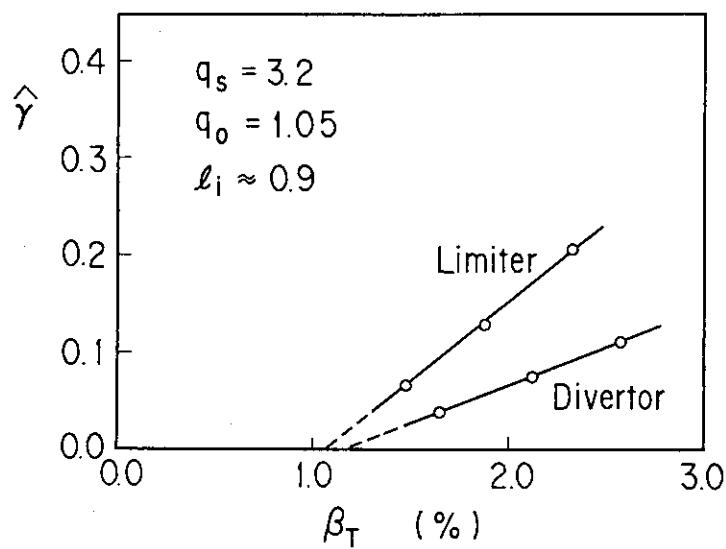


図1.2 典型的な圧力分布における、リミタ配位及びダイバータ配位プラズマの β_T に対する成長率

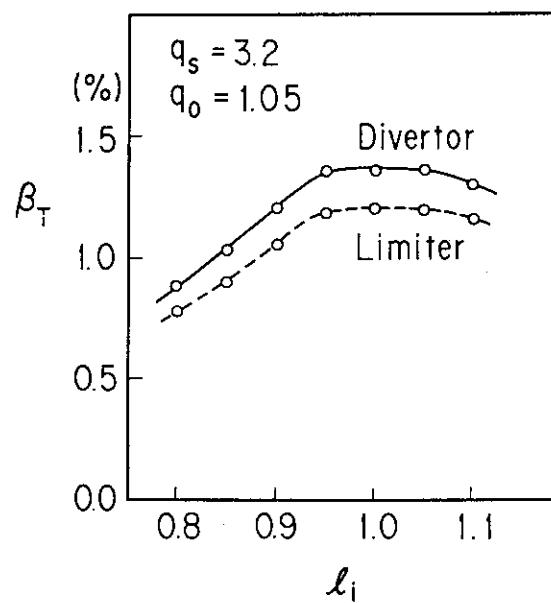
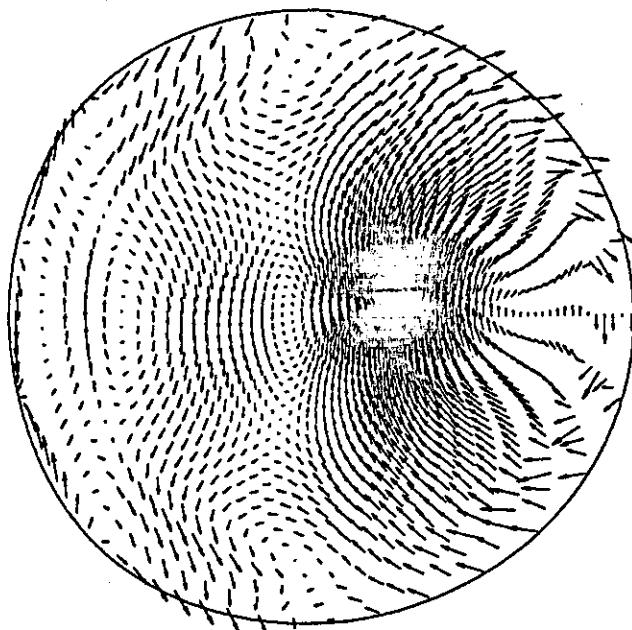
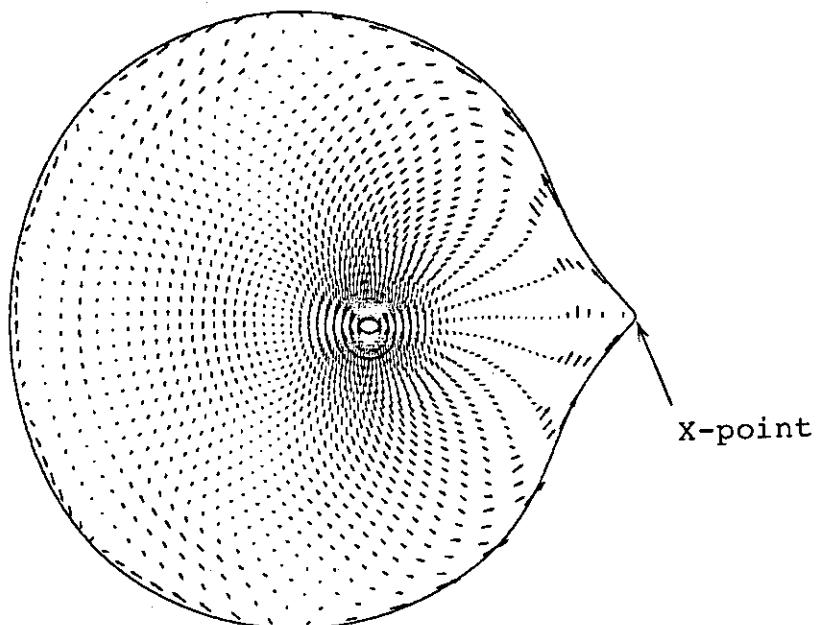


図1.4 典型的な圧力分布における内部インダクタンス l_i に対する β 限界



(a) LIMITER CONFIGURATION PLASMA

$N = 1.00$ QAXIS = 1.0027 QSURF = 3.1926
 $A = 3.706$ BETAP = 1.896 $\beta_T = 2.08\%$



(b) DIVERTOR CONFIGURATION PLASMA

$N = 1.00$ QAXIS = 1.0026 QSURF = 3.2016
 $A = 3.533$ BETAP = 2.059 $\beta_T = 2.32\%$

図13 リミタ配位プラズマ(図a)及びダイバータ配位プラズマ(図b)におけるキング・バルーニングモード変位図

4. 検討とまとめ

本報告では、JT-60のダイバータ配位について述べたが、ダイバータ配位による効果は、X点によるシアース ($= \frac{r}{q} \frac{dq}{dr}$) の効果であり、X点がポロイダル断面上、下あるいは内側にあっても、同様な効果が期待できるはずである。

そこで、内側にX点がある場合のキンク不安定性について、同様な解析手順で、3.1節で求めた代表的プラズマ ($\ell_i = 0.7$, $\beta_p = 0.1$) について解析した。図15に表面の安全係数 q_s に対する自乗成長率 γ^2 を示す。図4の結果と同様に、ダイバータ配位によって成長率の減少が起り、安定領域の拡大が見られた。また図16から、同様に、変位がプラズマ表面に局在し、磁気面に沿った動きをしていることがわかる。以上から、プラズマの近傍にX点を持つ配位は、その位置にかかわらず、キンク不安定性に対して安定化効果がある。

ここでは、理想MHDキンク不安定性に対する、ダイバータの効果を調べた。結果をまとめると次の様になる。

- 1) ダイバータ配位プラズマでは、シアーカーのため変位がより表面に局在し、不安定成長率が減少する。
- 2) 低 β ($\beta_p \lesssim 0.5$)においては、ダイバータ配位の方がリミタ配位に比べて安定領域が広い。ただし、高 β になるにつれて徐々に差がなくなる ($\beta_p \gtrsim 1.0$ では差がない)。
- 3) 高 β においてもダイバータ配位の方が、成長率の減少が見られるが、限界 β 値に対しては、殆んど差がない。

今後の課題として、圧力分布を最適化したダイバータ配位プラズマに対して、キンク・バルーンング不安定性によるベータ限界を求める予定である。

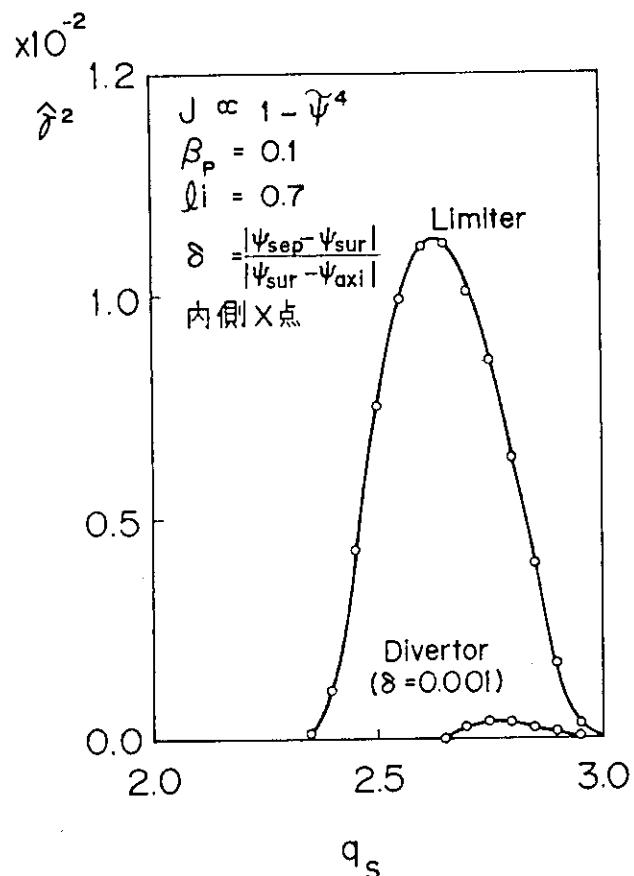
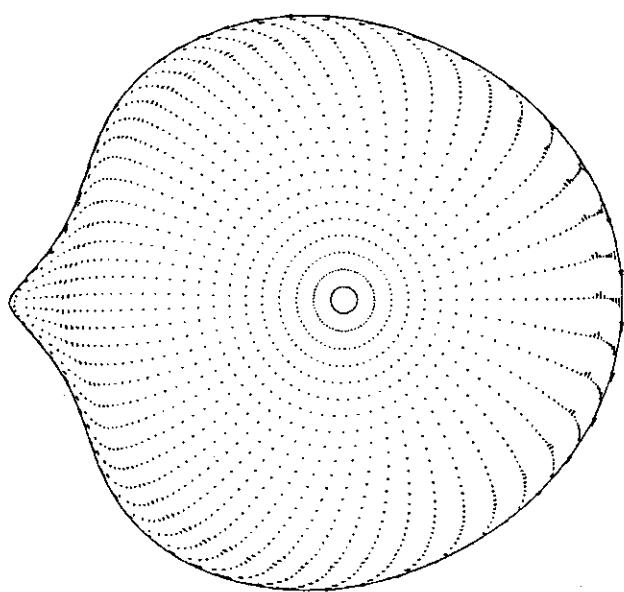


図15 内側にX点を持つダイバータ配位プラズマとリミタ配位プラズマの不安定成長率



JAERI TOKAI "ERATO-J"
 $N = 1.00$ QAXIS = 1.6498 QSURF = 2.6981
 $A = 3.297$ BETAP = 0.105

図16 内側にX点を持つダイバータ配位プラズマのキンクモード変位図

謝 辞

本検討を行うにあたり、ERATO-Jを使用いたしました。このコードの使用及び結果について貴重な御意見をいただきました。徳田伸二研究員、常松俊秀副主任研究員に深く感謝致します。臨界プラズマ実験室の皆様、下村安夫実験室長には、有益な討論をいただき厚く感謝いたします。さらに、終始ご指導、ご鞭撻戴いた吉川允二臨界プラズマ研究部長、田村早苗次長に厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 徳田伸二、常松俊秀、安積正史、滝塚知典、奈良岡覧逸、竹田辰興、"改訂版ERATO-JによるMHD安定性解析"、JAERI-M 9899(1982).
- 2) 小関隆久、安積正史、関省吾、常松俊秀、徳田伸二、滝塚知典、"JT-60における位置不安定性解析"、JAERI-M 86-022(1986).
- 3) 関省吾、安積正史、"JT-60に於ける限界ベータ、(1)バルーニング不安定性"、JAERI-86-025(1986).

謝 辞

本検討を行うにあたり、ERATO-Jを使用いたしました。このコードの使用及び結果について貴重な御意見をいただきました。徳田伸二研究員、常松俊秀副主任研究員に深く感謝致します。臨界プラズマ実験室の皆様、下村安夫実験室長には、有益な討論をいただき厚く感謝いたします。さらに、終始ご指導、ご鞭撻戴いた吉川允二臨界プラズマ研究部長、田村早苗次長に厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 徳田伸二、常松俊秀、安積正史、滝塚知典、奈良岡範逸、竹田辰興、"改訂版ERATO-JによるMHD安定性解析"、JAERI-M 9899(1982).
- 2) 小関隆久、安積正史、関省吾、常松俊秀、徳田伸二、滝塚知典、"JT-60における位置不安定性解析"、JAERI-M 86-022(1986).
- 3) 関省吾、安積正史、"JT-60に於ける限界ベータ、(1)パルーニング不安定性"、JAERI-86-025(1986).

付録 円柱プラズマモデルに対するキンクモード不安定領域

