

3 . 高閉じ込めは高ベータと両立するか？

3.1 閉じ込めはどこまで達成したか？

高瀬 雄一

(東京大学大学院新領域創成科学研究科)

3. Is High Confinement Compatible with High Beta?

3.1 How Good a Confinement has been Achieved?

TAKASE Yuichi

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwa 277-8561, Japan

(Received 25 July 2004)

Auxiliary heated confinement data are being accumulated from medium-size spherical tokamaks MAST and NSTX with aspect ratio $A = R/a \cong 1.5$. It has already been demonstrated that high beta (normalized beta $\beta_N > 5$) and good confinement (enhancement over tokamak H-mode confinement scaling $H_{98y2} > 1$) can be achieved simultaneously. Both L-mode and H-mode plasmas have energy confinement times comparable to or exceeding predictions of scaling laws based on conventional aspect ratio tokamak data. Analyses of kinetic profile data indicate that ion transport is near neoclassical in most cases, but electron transport is highly anomalous and is the dominant power loss channel. Indications of internal transport barrier formation are observed in both ion and electron temperature profiles, contributing to the core pressure increase.

Keywords:

low aspect ratio, spherical tokamak, confinement, transport, high beta

3.1.1 はじめに

中型トカマクに匹敵する規模の MAST [1] (英) および NSTX [2] (米) からの閉じ込めデータが蓄積されつつある (両装置の主要パラメータを Table 1 に示す). これらのデータは ITPA (国際トカマク物理活動) データベースにも登録され, トカマクデータベースの拡充に貢献している. ST 独自の閉じ込め比例則の導出も試みられているが, まだ不確定要素も多い (例えばデータベースフィッティングより求めた比例則と単一パラメータスキャンをした場合の依存性が異なる). 通常型トカマクの閉じ込め比例則と比較すると, 同程度あるいはそれ以上の閉じ込め時間が得られている. L モード* プラズマでもトカマクの H モードスケールリング (例えばよくトカマクの H モード* プラズマの閉じ込め時間の標準とされている ITER 98y,2 ELMy H

モードスケールリング [3] 程度の閉じ込め時間が得られていることは特筆に値する. 今のところ加熱パワーは L-H 遷移* 閾値を大幅には超えていないため, H モードの閉じ込め改善は L モードと比べそれほど顕著ではないように見える. L-H 遷移閾値パワーに比べ遥かに高いパワーを入力した場合, H モードの質的向上や内部輸送障壁* (ITB: Internal Transport Barrier) の形成により, 更なる閉じ込め改善が得られるかどうかは今後の実験で明らかになってくるであろう. ここでは最近の MAST [4, 5] および NSTX [6, 7] で得られた結果を中心に現状をまとめる.

3.1.2 H モード

MAST では空間300点トムソン散乱, 256コードの D_α カメラ, 576本のラングミュア - プローブ等の高分解能計測を使った H モードに関する詳細な研究が行われている. MAST の H モードは NSTX に比べてより明確なものである. この理由として, NSTX には安定化用の導体壁がプラズマの近くに設置されているのに対して, MAST では弱磁場側には障害物がないため, 周辺部における径電場およびそれに伴うトロイダル回転の生成が阻害されにくいことがあげられている. MAST ではトーラス内側 (高磁場側) か

Table 1 Main parameters of MAST and NSTX.

	MAST	NSTX
R (m)	0.85	0.85
a (m)	0.65	0.65
I_p (MA)	2.0	1.5
B_{T0} (T)	0.52	0.6

author's e-mail: takase@k.u-tokyo.ac.jp

* 印のついた用語は, 最後の用語解説を参照のこと.

らガスを供給することでトロイダル回転シアが強くなり（ヘリウムジェットを入射し、ドップラー分光で測定）、Hモードになりやすくなることがわかっている。また上下セパトトリックスが対称となる「連結されたダブルヌルダイバータ(CDND)」配位のときに質のよいHモードになりやすいが、これも上下のセパトトリックス磁気面の差をその赤道面上での位置の差 δr_{sep} で表すと、 $|\delta r_{sep}|$ がイオンラモア半径 ρ_i の半分程度以下の場合 ($-0.5 < \delta r_{sep}/\rho_i < 0.5$ の領域で、これを上下のX点がバランスしたCDND配位と呼ぶ) に速いトロイダルおよびポロイダル回転が得られていること (Fig. 1) で説明することができる。これとは対照的に、NSTXでは下シングルヌル (LSN) 配位の場合にHモードに最もなりやすい。NSTXでも誤差磁場の軽減、トラス内側ガスパフの採用、および高温ベーキング、ポロニゼーションなどの第一壁コンディショニングの進展に伴い、より質のよいHモードがより低いパワーで得られるようになってきた。

MASTやNSTXで得られているHモードプラズマの電子密度ペダスタルは極めて顕著で、中心密度とほぼ同じ高さである（場合によっては中心密度より高い）のに比べ、電子温度ペダスタルは中心温度の10 - 20%程度でそれほど顕著ではない。MASTで現有のパワーでHモードを得ているのはプラズマ電子密度 $n_e/n_{GW} \cong 0.8$ までであり (Lモードまで含めると $n_e/n_{GW} \cong 1.8$)、閉じ込め改善度も $n_e/n_{GW} \cong 0.6$

で $H_{H98y2} \cong 1.5$ が得られている。ここで $n_{GW} = I_p/(\pi a^2)$ はトカマクの密度限界の指標となる Greenwald 密度 8 J であり、 H_{H98y2} は ITER グループにより導出された 98y,2 ELMy Hモード閉じ込め比例則 [3] に対する閉じ込め時間の改善度である。MASTにおいてもNSTXにおいても安定な高ベータ、高閉じ込めのHモードプラズマ (MASTで $\beta_N \cong 5$, $H_{H98y2} \cong 1.5$, NSTXでは $\beta_N \cong 6$, $H_{89L} \cong 2$ を閉じ込め時間の8倍持続) が得られている。ここで H_{89L} はLモードプラズマの閉じ込めを表す ITER 89P スケーリング [9] である。

MAST, NSTXともHモードプラズマのエネルギー閉じ込め時間は、トカマクのスケールングに基づいた予測値と同程度である。NSTXのLモードおよびHモードの閉じ込め時間のトカマクスケールング (ITER 97L および ITER 98y,2) との比較を Fig. 2 に示す。MASTやNSTXのデータは、従来のデータベースのアスペクト比の範囲 ($A = R/a > 2.5$) を大幅に広げるもので、従来不明確であったアスペクト比依存性やベータ依存性を確定する重要な役割を果たしている。但し $A = 2$ 近傍のデータは欠落しているので注意を要する。これによると、エネルギー閉じ込め時間は ITER 98y,2 スケールングと矛盾しない。L-H 遷移の閾値パワー P_{LH} は $P_{LH} \propto R^2$ ではなく $P_{LH} \propto S$ (プラズマ表面積) スケールングを明らかに支持している。また、 P_{LH} は従来のトカマクスケールングの予測より有意に (70%程度) 高いため、 $A^{-0.5}$ の依存性を加える必要性も示唆されて

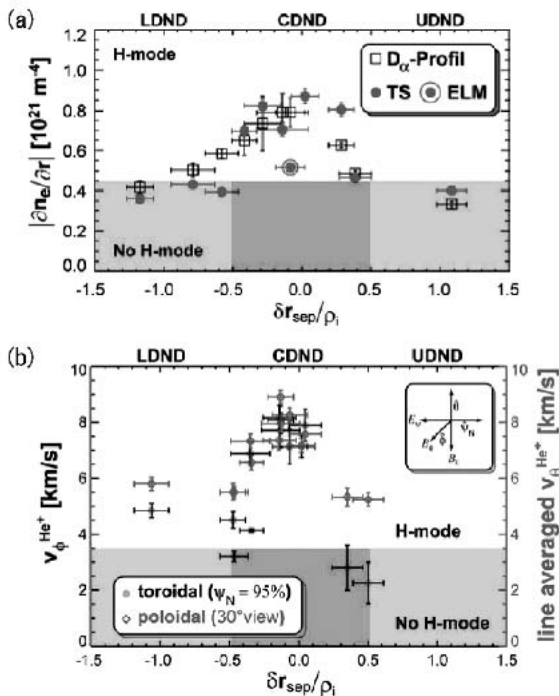


Fig. 1 (a) Variation in density gradient (from MAST Thomson scattering and D_α gradient data) and (b) toroidal (v_ϕ) and poloidal (v_θ) flow velocities plotted against $\delta r_{sep}/\rho_i$, indicating a transition to Ohmic H-mode and corresponding increase in rotation for CDND (balanced X-point) topology, compared to LDND and UDND (double null divertor configurations with dominant lower and upper X-point, respectively) [5]. H-mode discharges are characterized by $|dn_e/dr| > 0.45 \times 10^{21} \text{ m}^{-4}$, $v_{\phi, He^+} > 3.5 \text{ km/s}$ and $v_{\theta, He^+} > 3.5 \text{ km/s}$.

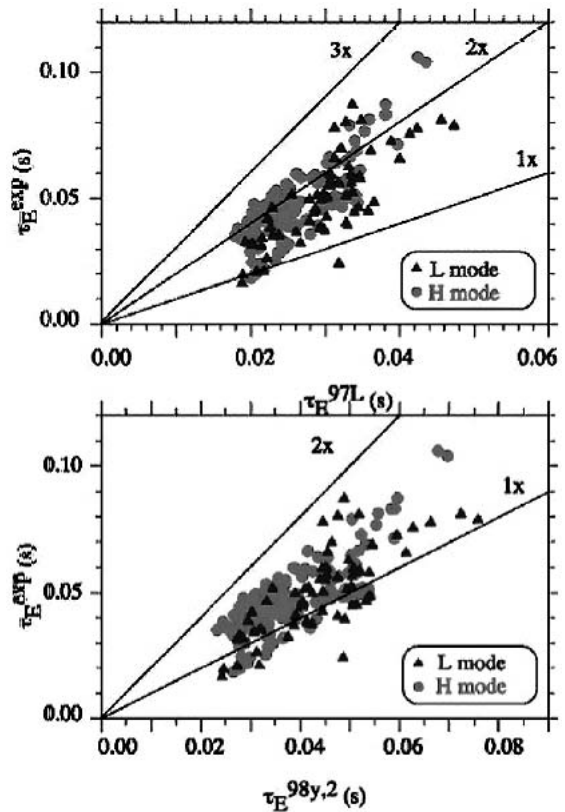


Fig. 2 Experimentally obtained energy confinement time τ_E^{exp} of L-mode and H-mode plasmas in NSTX, compared to values calculated from the ITER 97L L-mode scaling law τ_E^{97L} (top) and the ITER 98y,2 ELMy H-mode scaling law $\tau_E^{98y,2}$ [6].

いる。

3.1.3 輸送解析

NSTX の輸送解析では、イオンのエネルギー輸送は低く、新古典理論に基づく輸送係数でほぼ表されるが、電子輸送は乱流輸送に支配されていることが明らかとなっている。運動量（トロイダル回転）の輸送や不純物イオン（ネオン）の粒子輸送も新古典理論の予言と矛盾しない。Fig. 3 に NBI 加熱プラズマで実験的に得られた輸送係数 (χ_e , χ_i , χ_ϕ) の新古典理論値 (χ_i^{NC}) との比較を示す。これらの結果より、イオンの輸送に効く ITG モード（トカマクの乱流輸送に寄与するイオン温度勾配により駆動される不安定性）のような長波長モードは自然に抑制されており、電子の輸送のみに効く短波長モードのみが不安定となり乱流状態を形成していると推測される。

MAST でもほぼ同様の結果が得られている。NSTX では、場合によってはイオン温度が NBI による古典的な加熱とイオンに関して新古典輸送を仮定して計算される値より有意に高い場合もある。この理由はまだ説明されていないが、古典的な衝突過程のほか、高速イオンにより不安定化された波動を介して、高速イオンから熱的イオンにエネルギーが受け渡される可能性も指摘されている。密度揺動の相関長は ρ_s (イオンのラーモア半径を電子温度を使って評価したもの) に比例しており、これは粒子輸送が磁場の増大とともに低減されることを説明する有力な手がかりとなっている。

3.1.4 内部輸送障壁

H モードのほか、内部輸送障壁の形成も確認されている。トロイダル流速の勾配が急なところに強い温度勾配がついている。また速いトロイダル回転（アルヴェン速度の 20 - 30% 程度）に伴い、理論的に予測されるように、密度分布の非対称性（トラス外側へのピークのシフト）が観測されている。理論的にはこのような速い流れおよびその

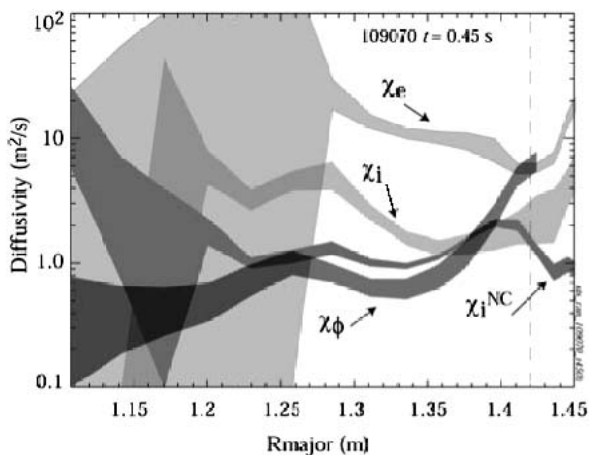


Fig. 3 Experimentally determined diffusivity profiles during high power NBI heating in NSTX. Electron thermal diffusivity χ_e , ion thermal diffusivity χ_i , momentum diffusivity χ_ϕ , and neoclassical calculation of ion thermal diffusivity χ_i^{NC} [7].

シアにより、不安定モードの線形成長率の低減や、乱流の安定化効果が予測されている。NSTX では高次高調速波* (HHFW) で加熱されたプラズマで電子輸送障壁の兆候が現れ、極めて高い中心電子温度 (4 keV) が観測されることがある。

3.1.5 周辺プラズマ

ST はコンパクトであるため、ダイバーター熱負荷は重大な問題となり得る。特に内側ダイバーターは半径の小さいところにあるため、熱負荷の低減が特に要求される。熱流束の内側対外側ダイバーターへの分配、熱流幅、周辺局在モード* (ELM) 発生時の熱流束等については5.4節に詳述されている。NSTX ではLモードプラズマにおいて、スクレープオフ層（セパトリックスの外側）で間欠的に現れるブロッブ (blob) と呼ばれる構造が可視光イメージングなどで、トカマクと同様に観測されており、これが径方向輸送を増大させていると考えられている。Hモードプラズマはこれと対照的に穏やかであり、このような構造は観測されていない。

3.1.6 結論

アスペクト比 $A \leq 1.5$ の球状トカマクでは、高ベータ ($\beta_N > 5$) と高閉じ込め ($H_{98y2} > 1$) が両立することが実証されており、高ベータ領域においても閉じ込めに顕著な劣化は観測されていない。LモードプラズマでもトカマクのHモード比例則程度の閉じ込め時間が得られ、Hモードプラズマではこれを若干上回る。今後、加熱パワーの増加に伴い、HモードやITBの質的向上による更なる閉じ込め改善も期待できる。 $A \cong 2$ の実験データは今のところ存在しないので、この領域で炉を設計する際には、スケーリング等の不確定性を設計の裕度として考慮しなければならない。今後、実験データが望まれる領域である。

参考文献

- [1] A.C. Darke *et al.*, *Proc. 18th Symp. On Fusion Technology*, Karlsruhe, 22-26 Aug. 1994 Elsevier (Amsterdam) Vol. 1, p. 799 (1995).
- [2] M. Ono *et al.*, *Proc. 18th Int. Conf. on Fusion Energy*, Sorrento, 2000 IAEA (Vienna) CD-ROM file EX7/5 (2000).
- [3] ITER Physics Basis, *Nucl. Fusion* 39, 2175 (1999).
- [4] M. Valovic *et al.*, *29th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion*, Montreux, 17-21 June 2002 ECA Vol. 26B, P-1.054 (2002).
- [5] R.J. Akers *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* 45, A175-A204 (2003).
- [6] E.J. Synakowski *et al.*, *Nucl. Fusion* 43, 1653 (2003).
- [7] B.P. LeBlanc *et al.*, *Nucl. Fusion* 44, 513 (2004).
- [8] M. Greenwald *et al.*, *Nucl. Fusion* 28, 2199 (1998).
- [9] P.N. Yushmanov *et al.*, *Nucl. Fusion* 30, 1999 (1990).