

平成21年 5月 8日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17206094  
 研究課題名（和文） 磁気島、エルゴディック層等の磁気面の乱れに対するプラズマ修復能力  
 研究課題名（英文） Plasma healing of magnetic island and ergodic layer

研究代表者  
 大藪 修義 (OHYABU NOBUYOSHI)  
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授  
 研究者番号：60203949

## 研究成果の概要：

磁場閉じ込め装置においてプラズマの性能を左右すると考えられる磁気島の成長・修復過程が、プラズマの効果によってどのように影響を受けるかを系統的な実験データ収集を行って調べた。プラズマの圧力が高く、かつ衝突周波数が低い場合に磁気島の修復が効果的に起こることが明らかになった。また、数値シミュレーションによるプラズマ電磁流体の平衡解析を行い、プラズマ圧力の増加に伴う磁場構造の変化について解析を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2006年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2007年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
総計	37,500,000	11,250,000	48,750,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ・核融合、自己組織化、磁気リコネクション、シミュレーション工学

## 1. 研究開始当初の背景

核融合磁場トーラス装置では、プラズマは入れ子状の磁場構造中に閉じ込められる。しかしこの閉じ込め構造は共鳴磁場に弱く、0.1%程度の摂動磁場でも、それが有面で共鳴する場合にはそこに磁気島が発生し、これが隣の磁気島と重なった場合は磁力線がある領域内をふらつくエルゴディックな領域になり、プラズマ閉じ込めに悪影響を与える。このような磁場構造の部分的な崩壊は、誤差磁場（コイルの製作、設置精度によるもの）により起こり、その強度は上述のようにな

り小さく（～0.1%）、核融合炉を設計する上で技術的問題点の一つとなっている。これまでのLHD（大型ヘリカル装置）の実験によると、摂動磁場をかなり大きくしてもプラズマの応答により、構造の変化が抑制されることがわかってきており、これは核融合研究にとって期待が持てる結果である。これとは逆にトカマク装置では磁気島は理論の予測どおりブートストラップ電流により拡大されることが実験で確認され、その制御・抑制が重要な課題になっている。

トーラス周辺領域は、真空磁場配位におい

てしばしばエルゴディック層が生じることがある。それによって電子の閉じ込めが劣化することが予想されるが、実際には明確な輸送の変化はあまり見られないことが多い。これはプラズマによってエルゴディック構造が磁気面構造に修復されている可能性を示している。これらの原因を解明することは、周辺閉じ込め物理機構の理解にも寄与すると考えられ、現在精力的に研究がなされている核融合プラズマの高性能化の一翼をお担うものである。

プラズマ中の磁場構造の変化は核融合プラズマ物理の重要なテーマだけでなく、磁気再結合過程を伴うため、天体プラズマ物理とも関連しており、その研究はプラズマ物理の基本的研究課題に寄与でき、学術的性格も高い。

LHD以外の稼働中のヘリカル装置では、詳細な分布計測機器がないため、上述のような研究は困難である。トカマク装置に関しては、JT60-U（日本原子力機構）、JET（欧州）、DIII-D（アメリカ）、ASDEX-UP（ドイツ）の実験結果が参考になる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、周辺部の磁場構造（磁気島、エルゴディック領域）がプラズマの影響によりどう変化するかをLHD装置で実験的に調べ、その物理機構を理論的にも解明することにある。トラスプラズマの閉じ込めでは、H-mode 放電にも関連して周辺部の閉じ込めの重要性が認識されている。磁気島の存在が径電場シェアーを誘起して閉じ込めの改善導いたり、局所的に圧力勾配の平坦化等でMHD-modeの安定化の可能性も指摘されており、これらについても検証する。

磁気島形成等の磁場構造の変化は、プラズマ電流密度勾配およびプラズマ圧力勾配が駆動力と考えられるが、LHDの場合はプラズマ電流が弱く、実質的にはプラズマ圧力勾配のみであるため理解しやすいと思われる。実験結果の解析にはMHD関連の理論家の研究への参加が不可欠であり、MHDコード等を駆使して理論的検討も行う。

## 3. 研究の方法

磁気島の真空磁場からの増減はプラズマによって誘起された径方向の共鳴磁場によってもたらされる。この磁場を計測するために磁気プローブの設置を行った。これまですでにトロイダル方向のモードを計測するた

めのコイルが設置されているが、さらにこれらの測定系の時間応答性などの充実を図るとともに、あらたにポロイダルモード測定用のサドルループコイルを設置した（図1）。これらのコイルによって得られた摂動磁場の強度、位相からプラズマの応答を解析し、他の計測器からのデータと組み合わせてプラズマパラメータ依存性について整理をおこなった。

さらに理論モデルの構築を目的として、実験データの理論的考察を進めるために、MHD平衡コードによる3次元数値シミュレーションを行い、磁場構造の変化、輸送特性について解析を行った。

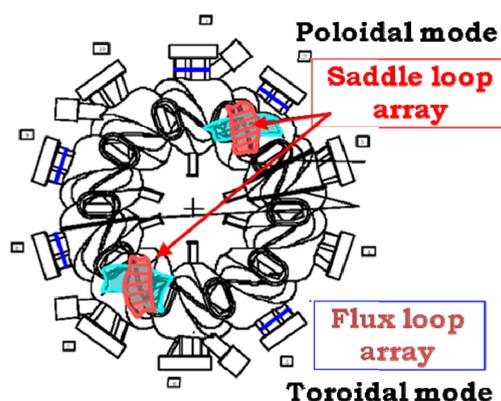


図1 LHD実験装置の上面図。赤色、青色で示されているのがそれぞれポロイダルモード、トロイダルモード測定用のコイル。

## 4. 研究成果

### (1) 磁気島の成長・修復のプラズマパラメータ依存性

プラズマ応答による  $m/n=1/1$  磁気島の拡大・縮小のパラメータ依存性をまとめたものを図2に示す。これより、低いプラズマ  $\beta$  値（=プラズマ圧力/磁場圧力）かつ高い衝突周波数  $\nu^*$  の領域において磁気島は真空磁場の場合よりも成長（拡大）し、一方高い  $\beta$  値かつ低い  $\nu^*$  において修復（縮小）されることがわかった。

成長から修復への遷移はその閾値の近傍では非常にわずかなパラメータの変化で起こる（表1）。また成長-修復の閾値は  $\beta$  値に強い依存性を持っており、逆に  $\nu^*$  に対しては弱い依存性である。このような系統的なデータ収集はこれまでで初めての試みであり、LHDのみでなく、トカマク装置においても共通の物理機構について理論モデルの構築に大きく寄与し得る。磁気島修復の理由の一

つとしてブートストラップ電流の向きの変化が挙げられるが、その依存性は現存の理論モデルからは $v^*$ に対して強い依存性を示しており、今回の実験結果を説明できない。今後、フィルスシュルター電流のような他の効果も考慮に入れて考察をすすめる。

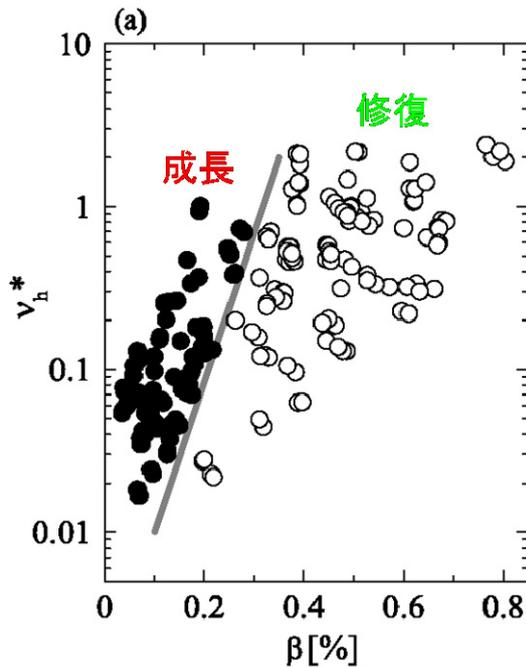


図2 磁気島の成長・修復のパラメータ依存性。●、○がそれぞれ成長、修復を表す。

表1 磁気島の成長(Growth)・修復(Healing)の閾値近傍でのわずかな $\beta$ 、 $v^*$ 変化に伴うプラズマ応答の依存性。

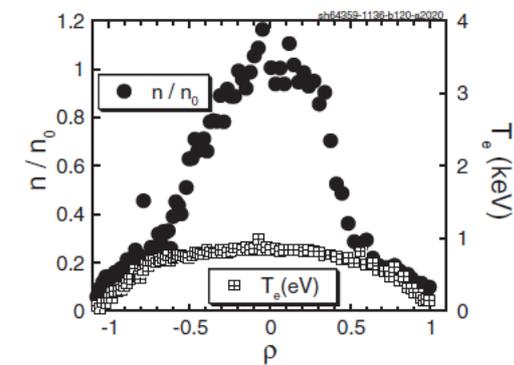
	Growth	Healing
$\langle \beta_{0.1} \rangle$	1.0[%]	0.7[%]
$\beta_{@v/2\pi=1}$	0.28[%]	0.33[%]
$v_h^*_{@v/2\pi=1}$	0.69	0.70

(2) 磁気島形成実験による粒子輸送障壁の発見

磁気島の形成と輸送特性に関連して、周辺部に  $m/n=1/1$  の磁気島を印加し、周辺部を強力に排気し、かつペレットによる中心粒子供給を行うことにより、図3に示すような極めて明瞭な粒子輸送障壁が  $\rho=0.5 \sim 0.6$  に形成されることを発見した ( $\rho$ は規格化小半径)。この輸送障壁は磁気シアアが小さくなる付近に形成されており、その内側では高密度領域

が現れる ( $\sim 5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ )。ベータ値を上げるほど輸送障壁はより小半径外側に現れ、中心の高密度領域が顕著になることがわかっているが、これは回転変換の分布の変化によるものであると考えられる。一方で、これまでの実験から磁気島はベータ値を上げるほど強く抑制されることがわかっており、MHD 安定性を介して磁気島修復と輸送障壁形成がお互いに影響し合っている可能性もある。今後この点についても考察をおこなっていく必要がある。今回の発見は、核融合装置における点火条件への実現に向けて、超高密度放電という新しいシナリオを切り開いた。

図3  $m/n=1/1$  磁気島印加時に強力な周辺排



気と中心粒子供給によって発見された粒子輸送障壁を伴ったプラズマ。中心部の密度  $n_0=4.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 。

(3) MHD平衡コードによる数値解析

プラズマの  $\beta$  値が上昇した場合の圧力分布から、磁場構造の形成についてMHD平衡コードHINT2により数値シミュレーションをおこなった。その結果、図4に示すように  $\beta$  の上昇とともにプラズマの圧力中心がトーラス外側に移動することにより(シャフラノフシフト)磁気面が乱れはじめ、磁力線に平行方向の輸送の寄与によりそこでの圧力勾配が減少することが明らかになった。通常、体積平均  $\beta$  値はプラズマ中心の  $\beta$  値とともに増えるが、磁気面の乱れに伴いその増加率が小さくなり、結果として平衡限界となっていると考えられる(図5)。

磁気島近傍の電流分布が磁気島修復に与える影響について、磁気島のX点におけるフィラメント電流のモデルによる初期的な結果を得た。それによると電流の向き(トロイダル方向に正負)にか

かわらず、磁気島の修復は起こらず、逆にフィラメント電流による摂動磁場の側帯波、高調波の影響で磁気面がさらに乱れる結果となった。これについては今後、電流の分布についてさらに議論をする必要があると思われる。

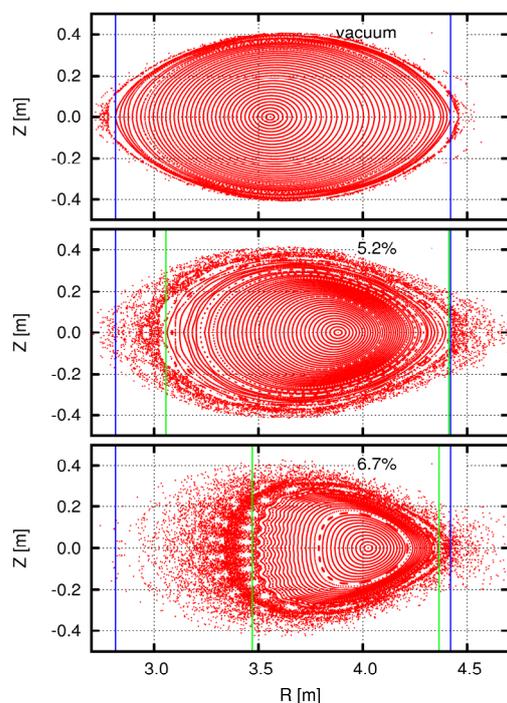


図4 MHD平衡コードHINT2による磁場構造の数値シミュレーション結果。上から順に $\beta$ 値が0, 5.2, 6.7%と増加。

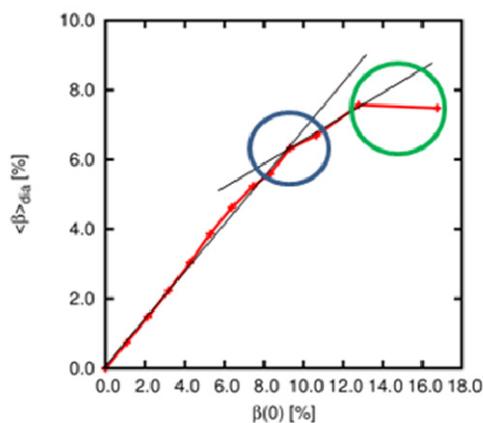


図5 体積平均 $\beta$ 値(縦軸)と中心 $\beta$ 値(横軸)の関係。

以上の数値シミュレーションの結果は $m/n=1/1$ の磁気島印加実験で見られた高 $\beta$ 値における磁気島修復とは定性的に逆の傾向を示している。今後、プラズマ応答による磁

気島修復の物理機構について、磁気島のモード数の違い、理論モデルにおけるブートストラップ電流、フィルスシュルター電流の大きさと向きを考慮した考察が必要である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計13件)

- ① 増崎貴、小林政弘、森崎友宏 (4番目)、大藪修義 (5番目) 他3名、” Investigation of particle and heat flux profiles on divertor plates in the Large Helical Device”、Journal of Nuclear Materialsに掲載決定(2009). 査読有り.
- ② 小林政弘、増崎貴 (6番目)、大藪修義 (7番目)、森崎友宏 (8番目) 他14名、” Model prediction of impurity retention in stochastic magnetic boundary and comparison with edge carbon emission in LHD”、Journal of Nuclear Materialsに掲載決定(2009). 査読有り.
- ③ 成嶋吉朗、鈴木康浩 (6番目)、大藪修義 (8番目) 他8名、” Dependence of spontaneous growth and suppression of the Magnetic island on beta and collisionality in the LHD”、Nuclear Fusion vol.48 (2008) 075010-1~075010-8. 査読有り.
- ④ 小林政弘、増崎貴 (3番目)、森崎友宏 (4番目)、大藪修義 (5番目)、他5名、” Modelling of impurity transport in ergodic layer of LHD”、Contributions to Plasma Physics vol.48 (2008) 255-259. 査読有り.
- ⑤ 成嶋吉朗、大藪修義 (4番目)、森崎友宏 (8番目) 他10名、” Magnetic diagnostics of magnetic island in LHD”、Plasma and Fusion Research vol.2 (2007) S1094-1~S1094-5. 査読有り.
- ⑥ 小林政弘、大藪修義、森崎友宏 (7番目)、増崎貴 (8番目)、他25名、” Edge transport control with the Local Island Divertor and recent progress in LHD”、Fusion Science and Technology、vol.52 (2007) 566~573. 査読有り.
- ⑦ 森崎友宏、大藪修義、増崎貴、小林政弘、長山好夫 (14番目)、鈴木康浩 (22番

- 目)、他 26 名、” Superdense core mode in the large helical device with an internal diffusion barrier”、 Physics of Plasmas vol.14 (2007) 056113-1~056113-8. 査読有り.
- ⑧ 大藪修義、” 定常化研究の現状 ヘリカルプラズマ定常化の現状”、 Journal of Plasma and Fusion Research, vol.83 (2007) 429-433. 査読無し.
- ⑨ 大藪修義、森崎友宏、増崎貴、小林政弘 (5番目)、他6名、” Observation of Stable Superdense Core Plasmas in the Large Helical Device”, Physical Review Letters vol.97 (2006) 055002-1~055002-4. 査読有り.
- ⑩ 大藪修義、森崎友宏、増崎貴、小林政弘 (5番目)、長山好夫 (26番目)、他28名、” Properties of the LHD plasmas with a large island&mdash;super dense core plasma and island healing”, Plasma Physics and Controlled Fusion vol. 48 (2006) B383-B390. 査読有り.
- ⑪ 小林政弘、森崎友宏 (4番目)、増崎貴 (5番目)、大藪修義 (7番目) 他6名、” 3D Divertor Transport Study of the Local Island Divertor Configuration in the Large Helical Device”, Contributions to Plasma Physics vol. 46 (2006) 527-533. 査読有り.
- ⑫ 成嶋吉朗、他13名、” Observation of Minor Collapse of Current-Carrying Plasma in LHD”, Plasma and Fusion Research vol.1 (2006) 004-1~004-3. 査読有り.
- ⑬ 長山好夫、成嶋吉朗 (3番目)、大藪修義 (4番目)、森崎友宏 (11番目) 他14名、” Experiment of magnetic island formation in Large Helical Device”, Nuclear Fusion vol.45 (2005) 888-893. 査読有り.

[学会発表] (計 7件)

- ① 森崎友宏、” Effect of Low  $m$  Magnetic Perturbations on LHD plasma with Highly Peaked Density Profile”, 4th Workshop on Stochasticity in Fusion Plasmas, 2009年3月2-4日, ドイツ、ユーリッヒ.
- ② 鈴木康浩、” Theoretical considerations of equilibrium limit in heliotron plasmas”, 4th Coordinated working group meeting, 2008年10月20-22日, スペイン、マド

リッド.

- ③ 鈴木康浩、” Identification of Island Dynamics using Magnetic Diagnostics”, 6th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association, 2007年12月3-5日, Gandhinagar, India.
- ④ 小林政弘、” LHDのエルゴディック層の輸送係数の評価”, 第24回プラズマ・核融合学会年会, 2007年11月27日, 兵庫県、姫路市.
- ⑤ 森崎友宏、” 無電流磁場閉じ込めプラズマの超高密度をもたらす拡散障壁”, 日本物理学会・第63回年次大会, 2008年3月25日, 大阪府、近畿大学.
- ⑥ 大藪修義、” Internal transport barrier in the LID discharge”, 11th International workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 2007年5月23-25日, 岐阜県、高山市.
- ⑦ 成嶋吉朗、” Experimental study of current driven MHD mode in LHD”, 第32回プラズマ物理に関する欧州会議, 2005年6月26日~7月1日, スペイン、タラゴナ.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大藪 修義 (OHYABU NOBUYOSHI)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：60203949

### (2) 研究分担者

#### (3) 連携研究者

長山 好夫 (NAGAYAMA YOSHIO)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：10126138

森崎 友宏 (MORISAKI TOMOHIRO)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：60280591

増崎 貴 (MASUZAKI SUGURU)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：80280593

成嶋 吉朗 (NARUSHIMA YOSHIRO)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・  
助教  
研究者番号：40332184

鈴木 康浩 (SUZUKI YASUHIRO)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・  
助教  
研究者番号：20397558

小林 政弘 (KOBAYASHI MASAHIRO)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・  
助教  
研究者番号：30399307