

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 22 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289342

研究課題名(和文) 交換型MHD不安定性の飽和機構とヘリカルプラズマ閉じ込め性能への影響の研究

研究課題名(英文) Study of the non-linear behavior of interchange MHD instability and its effect on the helical plasma confinement

研究代表者

渡辺 清政 (WATANABE, Kiyomasa)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：00249963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヘリカル型磁場核融合発電炉で、高圧プラズマの維持に大きな障害となる交換型不安定性の閉じ込めに与える影響を調べるために、大型ヘリカル装置(LHD)にマイクロ波反射計を設置し、不安定性による磁場容器の揺らぎや磁場容器上のプラズマの流速を計測した。また、不安定性の原因を解明するために数値シミュレーションを行った。その結果、LHDで観測される圧力が急激に減少する現象(コラプス)は磁気島を持つ不安定性が関与していることが分かった。この性質は、通常の交換型不安定性と異なる性質を持つが、シミュレーションによると、成長率は通常型より下がるが、磁気島構造を持つ交換型不安定性が存在することを発見した。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the effects of the interchange instability, which is expected to prevent the discharges with high pressure in helical type fusion reactor, on the plasma confinement, we install the reflect meter with micro-waves in the Large Helical Device (LHD), measure the fluctuation of the magnetic container and the plasma flow velocity on the container, and make the numerical simulation to make clear the driving mechanism of the instability. We find that the occurrence of collapse observed in LHD, which is a phenomenon that the plasma pressure is rapidly reduced, is strongly related with the instability with a magnetic island, which is not consistent with that of conventional interchange instability. We find interchange instability with the island structure, which has smaller growth rate than that of the conventional interchange instability, but the value is not so small comparing with the conventional one when the plasma resistivity is fairly large.

研究分野：核融合・プラズマ理工学

キーワード：核融合炉心プラズマ 環状磁場プラズマ 電磁流体力学的不安定性 ミリ波帯電磁波反射計測 電子密度揺動計測 交換型不安定性

### 1. 研究開始当初の背景

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(以下 LHD)は、経済的な核融合炉実現の目安となる体積平均ベータ値(プラズマ圧力と磁気圧の比)5%をヘリカル型核融合実験装置としては唯一達成している。LHD 型の磁場配位では小半径方向の広い領域で磁場強度が周辺領域に行くほど弱くなる磁気丘配位となり、波長が長く大域的な内部構造を持つプラズマ圧力勾配が原因となる抵抗性交換型 MHD(電磁流体学的)不安定性が現れ、ベータ値の運転可能領域の上限を与えると従来予測されてきた。抵抗性交換型不安定性は、圧力勾配が大きいほど、磁気丘度が高いほど、不安定化しやすいが、小半径方向の磁場の掠れ度合である磁気シアが強いと安定化されると予測されている。実際、磁気シアが弱い配位では小半径の広い領域に渡って急激なベータ値、電子温度の劣化(コラプス現象)が観測されている。一方、LHD では核融合炉に匹敵する高ベータ放電が、磁気シアが高い配位で達成されている。そのような放電でも、長波長の磁場揺動は観測されているが、ベータ値の急激な減少や温度勾配の広い領域に渡った平坦化は観測されず、揺動の共鳴有理面付近に局在化した圧力の平坦化構造が観測されるのみである。以上のように、ヘリカル型核融合炉の高ベータ実現に向けた MHD 不安定性の観点からは、以下の 2 つを大きな研究課題と捉えていた。

- (1) 磁気シアの高い配位で、不安定性による揺動は発生しているが、コラプス現象は起こさない場合の MHD 不安定性による閉じ込め劣化の原因の解明とその抑制法の研究。
- (2) 磁気シアの低い配位の放電で、コラプス現象が起こる条件の解明とその抑制法の開発。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、背景で示した 2 つの研究課題を解決するために、LHD の低磁気シア放電や高磁気シア放電で、既設の計測器のデータ解析を進めるとともに、新たに、マイクロ波帯の電磁波を使って等電子密度面の揺らぎ(磁気面の揺らぎに相当)やプラズマ流速分布を計測する計測器を設計・製作し、その計測器を LHD に設置し、データの収集・解析することにより、揺動レベルと閉じ込め性能の関係やコラプス現象の起きる物理機構の解明と、それに基づく不安定性の抑制方法の開発を目指す。併せて、主として、簡略化 MHD 方程式に基づく数値シミュレーションコードを使って、コラプス現象の起こる物理機構の解明やコラプス現象の起こる条件について調べる。

### 3. 研究の方法

- (1) MHD 不安定性による揺動強度の一つの指標は、小半径方向変位の振幅である。マイク

ロ波帯の電磁波は、ある電子密度(カットオフ密度)より高い密度領域に伝搬できず、カットオフ密度面で、電磁波が反射されるという性質を持っている。LHD の放電では、通常、電子密度はプラズマ周辺から中心に向かって大きくなる性質を持つので、プラズマ周辺部から磁気面に垂直になるように(小半径方向に)電磁波を入射し、その反射波が入射位置に戻ってくるまでの時間を計測し、プラズマ中の電磁波の伝搬速度を組み合わせると、カットオフ密度となる磁気面の電磁波に垂直方向の移動量、つまり、小半径方向の磁気面の変位量を求めることができる。また、カットオフ密度は、入射する電磁波の周波数によって変わるので、複数の周波数の電磁波を同時に入射すれば、小半径方向の変位量の小半径方向分布を計測できるようになる。本研究では、複数の周波数の電磁波を同時にプラズマに入射する方法として、マイクロ波コム反射計を設計・製作した。マイクロ波コム反射計とは、1GHz の高周波発生器の信号をコム生成器と呼ぶ高調波発生器を通し、複数の周波数の波を発生させ、その後バンドパスフィルターと周波数増倍器を用い、発信周波数 40~60GHz の 8 つの異なる周波数の電磁波を送信アンテナを使ってプラズマに入射し、反射波と入射波の位相差から、磁気面の変位量の振幅を求める計測器である。また、この計測器では、反射波の電磁波のスペクトルのドップラーシフトを調べることにより、磁気面上で、磁力線に垂直方向のプラズマ流速の時間変化を高速で観測することもできる。

- (2) LHD では、磁気シアが低い配位で、プラズマ電流を磁気シアが低くなる方向に流す場合、コラプス現象が観測されているが、その原因は特定されていなかった。最近、コラプスが観測される放電で、コラプスが発生する前に前兆的揺動信号が観測されることが発見され、その前兆揺動の振幅、周波数の時間変化を磁気計測器で、プラズマ流速の早い時間変化をマイクロ波反射計によるドップラーシフト計測で、ゆっくりしたプラズマ流速分布と径電場分布を荷電交換反応計測で、電子温度揺動分布を ECE 計測することにより、コラプスが起こる不安定性の性質を明らかにした。

- (3) LHD で観測される MHD 不安定性の原因を推定するために以下の数値シミュレーションモデルを使う。3次元 MHD 平衡解析コード VMEC[1]で評価した平衡データを基にメルシエパラメータ(ドーナツ形状のヘリカルプラズマに対する理想交換型不安定性の不安定性指標)を評価[2]、円柱モデル、簡略化 MHD、固有値評価法による不安定性の線形成長率、モード構造の解析、 $\Delta'$ の評価、3次元平衡配位に適用可能で、簡略化 MHD モデルと同等な 3次元 MHD 安定性解析コード FAR3D[3]。

#### 4. 研究成果

(1) LHD の閉じ込め性能に大きな影響を与えると考えられる交換型 MHD 不安定性は、LHD では、比較的磁場の低い放電条件で良く観測される。LHD は、MHD 揺動の内部構造を計測する方法として、電子サイクロトロン放射(ECE)計測や軟 X 線計測などを備えているが、ECE 計測は運転磁場と密度領域が、交換型不安定性が良く発生する領域と一致しないこと、軟 X 線計測は、揺動の積分計測のため、あまり高い空間精度を有しないことや局所分布は推定値であることなどの弱点があった。一方、マイクロ波反射計を使うと、電磁波の周波数を適当に選べば、LHD で交換型不安定性が良く観測される磁場、密度領域での揺動分布計測が可能となるという利点を有している。そこで、電子密度が 20~40 兆個/cc のプラズマの揺動を計測できるような計測システムを製作し、その時間分解能や空間分解能をテストスタンドを用いて評価した。時間分解能は、マイクロ波の最低周波数が、27.7GHz で、データ収集の ADC のサンプリング周波数が 1MHz なので、計測器の時間分解能は 1MHz であり、交換型不安定性の典型的な周波数である 10kHz 以下の揺動を十分計測できる。また、空間分解能は、磁気面の変位量として、0.03mm であることが分かった。これは、LHD のプラズマ小半径の 1 万分の 1 以下で交換型不安定性の揺動分布計測には、十分な空間分解能を持つことが分かった。この計測器を LHD の実験に適用した結果を図 1 に示す。LHD の放電条件は、磁気シアが高く、運転磁場が 1.38 テスラで、電子の線平均密度は 35 兆個/cc で、体積平均ベータ値は約 1% である。図 1 は、磁気計測器で計測されたポロイダルモード数 1、トロイダルモード数 1 の磁場揺動と相関の高い磁気面揺動の小半径方向の変位量の小半径分布を示しており、横軸は真空最外殻磁気面の小半径で規格化したプラズマ小半径である。縦軸のエラーバーは揺動の複数周期に渡った振幅の最大、最小から評価した。揺動振幅は規格化した小半径が 0.91 あたりで最大となっているが、MHD 平衡解析からこの位置は回転変換が 1 の有理面に対応し、交換型不安定性の理論予測と一致している。図 2 に磁場揺動強度と最大揺動振幅の関係を示す。赤 が軟 X 線計測によるデータで、青 がマイクロ波反射計で計測した結果である。従来、小半径の 3% 程度の変位量までしか観測できなかった変位量が 1% まで計測できるようになったことが分かる。また、磁場揺動強度と小半径方向の変位量の最大値は、変位量が小半径の 0.1~2% の幅広い範囲で比例関係にあることも分かった。

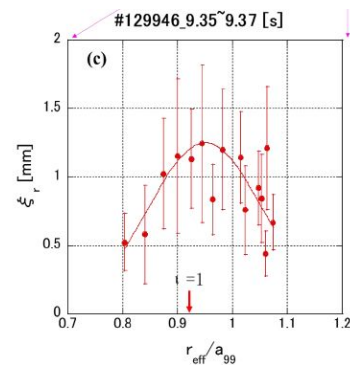


図 1 LHD のマイクロ波反射計で観測された交換型不安定性の小半径方向変位 ( $\xi_r$ ) の小半径分布。

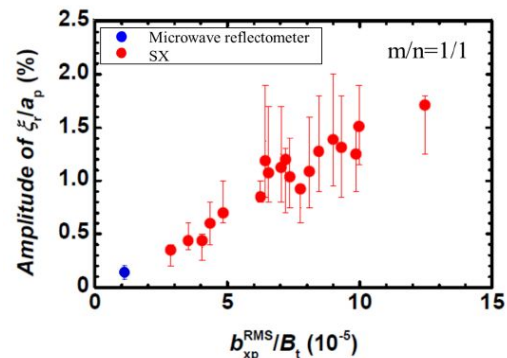


図 2 小半径方向変位と磁場揺動強度の関係。赤 ; 軟 X 線計測、青 ; マイクロ波反射計。

(2) LHD でコラプス現象が観測される放電は、前兆振動が観測される場合、コラプスの直前で周波数の減少と揺動強度の急激な増加が観測され、その振る舞いがトカマクのロケットモードと似ていることから、ロケットモード様不安定性と呼ばれている。揺動の周波数と径電場による回転周波数、反磁性周波数を比較することにより、揺動の周波数は、径電場による回転と電子反磁性回転の和によく一致すること、揺動周波数が減少するのは、初期は共鳴有理面がプラズマ電流の増加につれて、径電場による回転周波数が小さい領域に移動することにより減少し、後期は共鳴有理面上の径電場による回転周波数と電子反磁性回転周波数の和そのものが小さくなることから減少することが分かった。また、揺動周波数が減速する時間帯の共鳴有理面付近のプラズマ流速がゼロを切るようになること(図 3)、電子温度揺動分布が有理面を挟んで、奇関数構造になること(図 4)が分かった。このことから、揺動周波数の減少と振幅の増加は、磁気島を持つ不安定性と関係が深いことが推測できるようになった。

(3) ロケットモード様不安定性の発生する放電で、プラズマ電流分布を動的シュタルク効果(MSE)を考慮したプラズマ分光計測で、プラズマ圧力分布をトムソン計測による電子密度、温度計測で、最外殻磁気面形状を多様な圧力分布に基づく MHD 平衡データベースと電子温度分布計測を

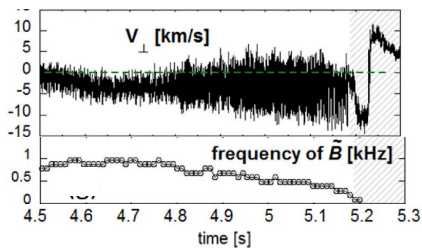


図3 LHDのマイクロ波反射計で観測されたプラズマ流速の速い時間変化。

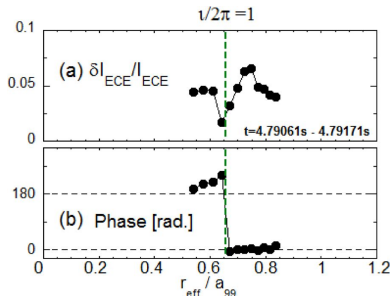


図4 LHDのECE計測で観測されたロケットモード様不安定性の前兆振動の振幅と位相差の小半径分布。

使って評価し、実験と矛盾の無いMHD平衡配位を再構築して、メルシエパラメータ、 $\Delta'$ (テアリングモードの安定性指標)を評価したところ、前兆揺動が観測され、揺動振幅の増加や周波数の減少が起こる前に、いずれの安定化の指標も大きく不安定を予測することが分かった。また、FAR3Dコードで、線形の小半径方向のモード構造と幅を評価したところ、メルシエパラメータが大きく不安定な場合に、小半径の50%を超える大きなモード構造を予測した。しかしながら、理論予測のモード幅、モード構造はいずれも計測結果と異なる。一方、円柱モデルに基づく固有値解法に基づく解析では、ポロイダルモード数、トロイダルモード数が同じであるが、小半径方向の節点の異なる固有関数を持つ固有値(不安定性)が予測され、磁気島を有する交換型不安定性の存在の可能性が示されている。FAR3Dは、時間発展解法のコードあることから、ロケットモード様不安定性の原因解明には、3次元平衡配位に対応可能な固有値解法に基づくコードの開発が必要なが分かった。

<引用文献>

- [1] S.P.Hirshman et al., Comput. Phys. Commun. 43 (1986) 143.
- [2] C.Mercier, in Plasma Physics and Cont. Nucl. Fusin Res. (Proc. IAEA Int. Conf. Salzburg, 1961), Nucl. Fusion Suppl., Part2 (1962) 801.
- [3] L.Garcia, in Proc. 25th EPS Int. Conf. (Prague, Czech Republic, 1998) vol.22A, PartII, p1757.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5件)

Y.Takemura, K.Y.Watanabe, T.Tokuzawa

他9名, Experimental Study on Slowing-down Mechanism of Locked Mode-like Instability in LHD, Plasma Fusion Res., 査読有, vol.12, 2017, in press.

T.Tokuzawa, Y.Takemura, K.W.Watanabe, 他10名, Distorted magnetic island formation during slowing down to mode locking in helical plasmas, Nucl. Fusion, 査読有, vol.57, 2017, 076003 (6pages), <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6d26>.

R.Soga, T.Tokuzawa, K.Y.Watanabe, 他4名, Developments of frequency comb microwave reflectometer for the interchange mode observations in LHD plasma, J. Inst., 査読有, vol.11, 2014, C02009 (7pages), doi:10.1088/1748-0221/11/02/C02009.

T.Tokuzawa, 他17名, Observation of multi-scale turbulence and non-local transport in LHD Phys. plasma, 査読有, vol.21, 2014, 055904 (7pages), doi:10.1063/1.4876619.

R.Ueda, K.Y.Watanabe, Y.Matsumoto, M.Itagaki, M.Sato and S.Oikawa, Characteristics of magnetic island formation due to resistive interchange instability in helical plasma, Phys. Plasmas, 査読有, vol.21, 2014, 052502 (8pages), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4875340>.

[学会発表](計 12件)

渡邊清政、岡本征晃、武村勇輝、佐藤雅彦、徳沢季彦、他2名, LHDにおけるロケットモード様不安定性の安定性解析、プラズマ・核融合学会第33回年会、2016年11月29日~12月2日、東北大学(宮城県仙台市)。

武村勇輝、渡邊清政、徳沢季彦、他9名、ロケットモード様不安定性の実験研究、プラズマ・核融合学会第33回年会、2016年11月29日~12月2日、東北大学(宮城県仙台市)。

竹原啓太、徳沢季彦、渡邊清政、LHDにおける高空間分解ECE計測のための金属レンズ付きアンテナの開発、プラズマ・核融合学会第33回年会、2016年11月29日~12月2日、東北大学(宮城県仙台市)。

徳沢季彦、武村勇輝、渡邊清政、他6名、LHDにおけるロケットモード様不安定性発生時のプラズマ回転速度変化の観測、プラズマ・核融合学会第33回年会、2016年11月29日~12月2日、東北大学(宮城県仙台市)。

T.Tokuzawa, Y.Takemura, K.Y.Watanabe 他10名, Magnetic Island formation in locked-like mode in helical plasmas, 20th IAEA Fusion Energy Conference, 2016年10月17日~22日、京都国際会館(京都府京都市)。



K.Y.Watanabe, 他 5 名, Effect of Resonant Magnetic Field on MHD properties in LHD plasma, 20th Inte. Stellarator-Heliotron Workshop, 2015 年 10 月 5 日~9 日, Greifswald(Germany).

Y.Takemura, K.Y.Watanabe, 他 5 名, Estimation of internal structure of resistive interchange instability in LHD, 20th Inte. Stellarator-Heliotron Workshop, 2015 年 10 月 5 日~9 日, Greifswald(Germany).

曾我良太、徳沢季彦、渡邊清政、LHD プラズマにおける交換型不安定性の観測とその構造に関する研究、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 21 日~24 日、早稲田大学(東京都)。

M.Sato, 他 2 名, Propagation of Resistive Interchange modes, Plasma Conf. 2014, 2014 年 11 月 18 日~21 日、朱鷺メッセ(新潟県新潟市)。

T.Tokuzawa, 他 15 名, Multi-Measurement for Study of Plasma Turbulence in the LHD, Plasma Conf. 2014, 2014 年 11 月 18 日~21 日、朱鷺メッセ(新潟県新潟市)。

K.Y.Watanabe, S.Masamune, S.Sakakibara, Y.Takemura, M.Sato, 他 3 名, Response of Interchange Instability to Resonant Magnetic Field by External Coils, 24th Int. Toki Conf., 2014 年 11 月 4 日~7 日、セラトピア土岐(岐阜県土岐市)。

渡邊清政、政宗貞男、榊原悟、武村勇輝、佐藤雅彦、他 3 名、外部摂動磁場印加に対する交換型不安定性の応答、第 10 回核融合エネルギー連合講演会、2014 年 6 月 19 日~20 日、筑波大学(茨城県つくば市)。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 清政 (WATANABE, Kiyomasa)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：00249963

### (2) 研究分担者

徳沢 季彦 (TOKUZAWA, Tokihiko)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：90311208

佐藤 雅彦 (SATO, Masahiko)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：80455211

### (3) 連携研究者

榊原 悟 (SAKAKIBARA, Satoru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：90280594

大館 暁 (OHTACHI, Satoshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：00270489

鈴木 康浩 (SUZUKI, Yoshihiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：20397558  
(平成 28 年度より連携研究者)

土屋 隼人 (TSUCHIYA, Hayato)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：90509522

武村 勇輝 (TAKEMURA, Yuki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：60705606  
(平成 28 年度より連携研究者)

板垣 正文 (ITAGAKI, Masafumi)

北海道大学・大学院工学研究院・名誉教授  
研究者番号：30281786  
(平成 28 年度より連携研究者)

岡本 征晃 (OKAMOTO, Masaaki)

石川工業高等専門学校・電気工学科・准教授  
研究者番号：60508290  
(平成 28 年度より連携研究者)

柴田 欣秀 (SHIBATA, Yoshihide)

岐阜工業高等専門学校・電気情報工学科・助教  
研究者番号：26820400  
(平成 28 年度より連携研究者)

### (4) 研究協力者

曾我 良太 (SOGA, Ryouta)

名古屋大学・大学院工学研究科・修士課程学生

竹原 啓太 (TAKEHARA, Keita)

名古屋大学・大学院工学研究科・修士課程学生