

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14696

研究課題名（和文）トカマク炉における三次元非軸対称磁場の裕度評価に向けた統合コード開発

研究課題名（英文）Development of plasma response simulation code against three-dimensional magnetic field in tokamaks

研究代表者

井上 静雄 (Inoue, Shizuo)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂研究所 先進プラズマ研究部・主任研究員

研究者番号：80757956

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではプラズマ崩壊の主要因である、装置の製作・設置誤差によって生じる誤差磁場にプラズマ内部の磁気島が捕捉され生じる不安定性ロケットモードの安定化に向けて、AEOLUS-ITが予測する誤差磁場に対するプラズマ応答の実験検証を更に進め、多階層的な振る舞いについて実験とシミュレーションで検証を行い隔年のIAEA FEC会合で発表、Nuclear Fusion誌に投稿した他、これまで難しかった誤差磁場によって放電終盤に生じるロケットモードの安定化手法について、磁気島に共鳴し振動を励起する事で生じるエネルギーのカスケードを応用する手法を着想し、シミュレーションにより安定化効果を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマはそれ自身の回転により誤差磁場を遮蔽するが、誤差磁場は装置壁に流れる渦電流やコイルの非軸対称により生じ、その遮へいはプラズマの非線形的な振る舞いにより生じる。本研究では遮蔽・浸透の多階層的な物理を明らかにするとともにトカマク型装置における誤差磁場の許容値緩和により原型炉の建設コスト削減に貢献しうる、新しいロケットモード回避手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：This research objective is to explore locked modes, which is a major cause of plasma disruption in the tokamak devices and is caused by error fields that stem from the errors of the installation and construction of devices. The AEOLUS-IT code predict the plasma response against the error field, which is validated by the experiment in the DIII-D in US. The key result is the multi-hierarchy response between the external field and the internal magnetic island, which was reported in the IAEA Fusion Energy conference and is published in Nuclear Fusion Journal. Furthermore, we found the new stabilization scheme of the magnetic island by the external magnetic field by exiting the resonant oscillation of the magnetic island, which can be considered as energy cascade and was reported in the American Physics Conference.

研究分野：核融合学

キーワード：誤差磁場 磁気島

## 1. 研究開始当初の背景

核融合エネルギーの科学技術的な実現可能性の実証を目指し ITER が建設中の現在、ITER 後の発電実証に向けた原型炉設計が急務であり、核融合発電実用化以降の経済的展望を示す事が求められる。ITER では他の配位に比べ高いプラズマ閉じ込め性能を有する為、大半径方向に軸対称な磁場構造を有するトカマク型の配位が採用され、原型炉でも採用予定である。トカマク型の磁場閉じ込め配位では、理想的には軸対称なコイル・真空容器とプラズマが作る磁場を併せ磁気面を形成し閉じ込める。しかし現実にはコイルの非円形度や非軸対称性、導体壁に流れる渦電流など様々な要因で生じる非軸対称な誤差磁場が存在する。誤差磁場はプラズマが二流体・運動論的な効果により自発的に駆動する流れにより遮蔽可能で、その流れが遅いプラズマ電流立ち上げ時に遮蔽可能かが焦点である。プラズマの流れが遮蔽に十分でなかった場合、誤差磁場が浸透し、磁気面を破壊する。磁気島が誤差磁場に捕捉されて生じるロックモードはプラズマ崩壊の主要因であり対策が急務である。また、プラズマ電流と誤差磁場間に生じるローレンツ力でプラズマが上下方向に移動する垂直位置不安定性が生じ得る。垂直位置不安定性も装置に電磁的・熱的な負荷を与え対策が急務である。

## 2. 研究の目的

本研究ではプラズマ崩壊の主要因である、装置の製作・設置誤差によって生じる誤差磁場にプラズマ内部の磁気島が捕捉され生じる不安定性ロックモードの安定化に向けて、誤差磁場に対するプラズマ応答の数値計算による解明と、その実験的検証を行う。また新しいロックモードの安定化手法の提案や垂直位置不安定性の安定化・予測可能なシミュレーターの開発も行う。

## 3. 研究の方法

プラズマ電流立ち上げ時の導体壁に流れる渦電流や与えられたコイル電流からプラズマ平衡を計算する平衡制御シミュレーター (MECS) と、誤差磁場に対するプラズマの応答を計算する二流体効果・運動論効果を含む拡張電磁流体 (MHD) シミュレーションコード (AEOLUS-IT) を駆使することで、磁場の浸透/遮蔽によって生じる磁気面の破壊：ロックモードの物理的や、ローレンツ力による垂直位置不安定性の予測や制御手法を開発する。誤差磁場に対するプラズマ応答の計算には AEOLUS-IT を用い、その実験的な検証には米国 DIII-D 装置を用いる。垂直位置不安定性の制御の検証には MECS により行い、予測には機械学習手法の一つである Support Vector Machine を用いて予測器を開発する。

## 4. 研究成果

核融合プラズマでは磁力線のかごにプラズマを閉じ込めるが、磁力線が繋ぎ代わり“磁気島”が形成されるとプラズマの性能が低下し最悪の場合プラズマが崩壊する。磁気島の安定化手法の一つにプラズマ外部から磁気島を打ち消すように磁場を与える外部磁場がある。従来理論 [Fitzpatrick 93] では、外部磁場による安定化効果は、規格化されたプラズマ抵抗率 $\eta$ 、外部磁場と磁気島との位相差のコサイン $\cos \delta\theta$ によって

$$\text{安定化効果} \propto -\eta \cos \delta\theta \quad (1)$$

で表され、位相反転時 ( $\delta\theta = \pi$ ) に最大となる。一方で、これまでの解析により $\delta\theta$ が時間振動する際にも安定化することを見出したが、抵抗率 $\eta$ を変えると位相差 $\delta\theta$ が変わってしまい独立に制御できなかった為、 $\delta\theta$ 振動による安定化が式(1)で説明されるか否かが未解明であった。今回安定化効果の因果を明確化する為、

$$\delta\theta = \pi(1 + \alpha_F \sin \omega t) \quad (2)$$

により位相を反転しながら $\alpha_F \sin \omega t$ で振動させる新しい制御を着想し、非線形 MHD コード AEOLUS-IT に実装した。シミュレーションを行い、 $\delta\theta = \pi$ で最大となるはずの安定化効果が、 $\alpha_F \sin \omega t$ で振動し位相反転状態から周期的に外れた方が強くなるという、従来理論予測と反する結果を得た。結果を図 1 に示す。横軸の抵抗率は装置が大型化する程プラズマ性能(温度等)の向上により一般に低くなり、 $\eta = 10^{-8}$ は大凡 JT-60SA プラズマの抵抗率である。式(2)より $\alpha_F = 0$ の時は $\delta\theta = \pi$ で、 $\alpha_F = 0.5$ でそれに振動が加わる。 $\alpha_F = 0$ の場合、安定化効果の $\eta$ 依存性が式(1)の予測通り得られたが、 $\alpha_F = 0.5$ の場合、 $\eta$ 依存性は見られない。JT-60SA 等の大型トカマクでは $\eta$ は更になくなる為、低 $\eta$ で安定化効果が弱くならない事は望ましい。また $\eta = 10^{-7}$ の時、 $\alpha_F$ が有限で振動がある場合、ない場合と比べ 10 倍程安定化される。 $\alpha_F$ が有限で $\delta\theta = \pi$ から外れると式(1)より $-\cos \delta\theta$ が理想的な位相反転時と比べ小さくなり、安定化効果も弱くなるはずで、本結果は従来予測と反し、新しい安定化機構の存在を示唆している。本解析成果は、第 61 回アメリカ物理学会にて発表した。

さらに、AEOLUS-IT の結果の実験的な検証を行う

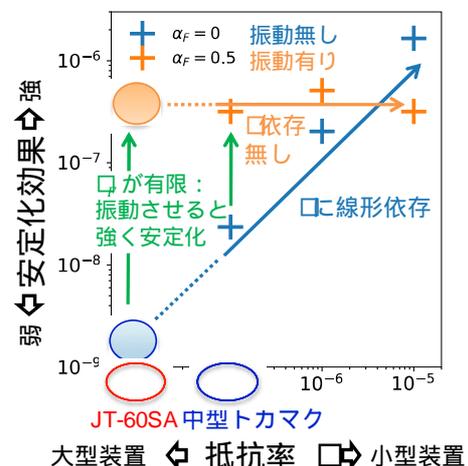


図 1 磁気島に対する安定化効果のプラズマ抵抗率 $\eta$ 依存性。

た。本研究では、DIII-D で実験的に計測可能なプラズマ境界での磁場などの物理量と AEOLUS による数値計算とを対比した。実験では、残留誤差磁場によって生じた LM の制御の為 75Hz の回転磁場を外部コイルにより印加し、コイル電流を 3.1kA から 4.3kA に変化させ、二種類の磁場応答を観測した。下図に得られた磁場応答のトロイダル角依存性の時間発展(黒→赤→黄色線)を示す。実験で観測された定在(応答 I、3.1kA)・進行(応答 II、4.3kA)する二種類の磁場応答(図 2(a)) と対応する応答がシミュレーションにより再現され(図 2(b))、それぞれ誤差磁場が浸透し LM が生じている状態と回転磁場が浸透し LM が解放された状態とに対応することが明らかになった。り LM 制御の可否が判断可能かであることを示唆している。本成果は IAEA FEC 会合、Nuclear Fusion 誌で発表した。

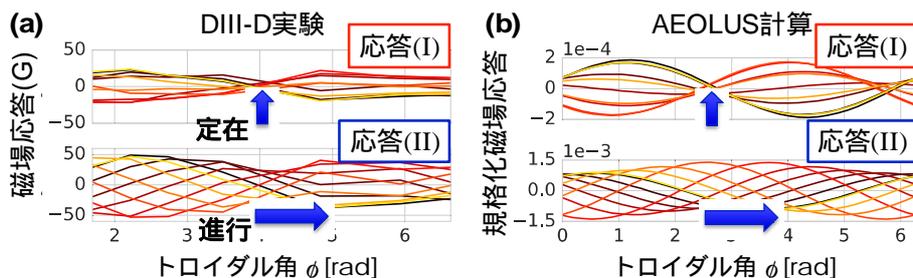


図 2 DIII-D 実験と AEOLUS 計算との対比。(a)DIII-D 実験と(b)AEOLUS 計算における磁場応答のトロイダル角依存性の時間発展。高周波成分について定在/進行する二種類の磁場応答を観測し、計算によりその背景物理を明らかにした。

最後に垂直位置移動現象の制御と予測について、平衡制御コントローラーにより電源の電圧飽和度を評価し、機械学習により垂直位置不安定性 (VI) の予測を行なった。以下結果を示す。予測は116のシミュレーション(300万を超えるデータ点)に対して行った。従来の、垂直方向の速度とVIの成長率と相関があるdecay-indexの2変数による予測結果を図3(a)に示す。図中のデータ点は赤バツが直後にVIの生じる不安定なデータ点、青丸はそれ以外の安定なデータ点を示す。赤く塗った領域が、AI機械学習手法の一つであるサポートベクターマシンが予測したVI不安定な領域である。図より青丸点が含まれ誤分類している事が分かる。この場合の予測精度は75%である。次に、電圧の飽和度を導入した場合の予測結果を図3(b)に示す。ここでは、図中に示す電圧飽和度 $\pm 5\%$ の範囲に存在するデータ点を表示している。図より電圧飽和度が増す程、VI不安定と予測される領域が拡大しており、電圧飽和度の物理的意味からの予測と定性的に一致する。定量的には、予測精度が10%以上上昇し、88%となった。AIが電圧飽和度によりVI安定/不安定なデータを正しく分類し、結果予測精度が向上する事を初めて示した。本結果を Nuclear Fusion 誌において発表した。

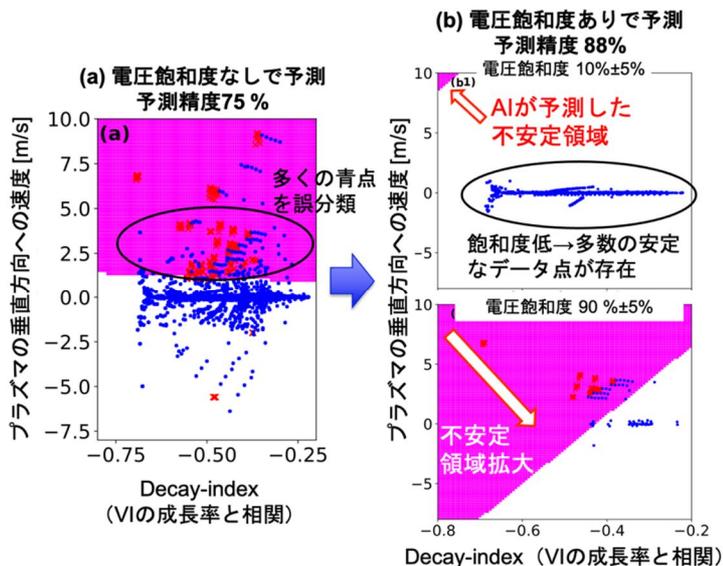


図3 電源飽和度(a)なし/(b)ありでのVIの予測結果。電圧飽和度が増す程、VI不安定と予測される領域が拡大する(図b)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inoue Shizuo	4. 巻 168
2. 論文標題 Calculation of diamagnetic and I by using Cauchy Condition Surface scheme	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112401 ~ 112401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2021.112401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 BANDO Takahiro, INOUE Shizuo, SHINOHARA Kouji, ISAYAMA Akihiko, WAKATSUKI Takuma, YOSHIDA Maiko, HONDA Mitsuru, MATSUNAGA Go, TAKECHI Manabu, OYAMA Naoyuki, IDE Shunsuke	4. 巻 16
2. 論文標題 Non-Resonant $n = 1$ Helical Core Induced by $m/n = 2/1$ Neoclassical Tearing Mode in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1402030 ~ 1402030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1402030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okabayashi M., Inoue S., Logan N.C., Taylor N.Z., Strait E.J., de Grassie J., Ferraro N., Hanson J., Jardin S., La Haye R.J., Liu Y.Q., Paz-Soldan C., Sugiyama L., Wingen A.	4. 巻 59
2. 論文標題 A new stabilizing regime of tearing mode entrainment in the presence of a static error field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126015 ~ 126015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab37d2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ono Y., Inoue S., Tanabe H., Cheng C.Z., Hara H., Horiuchi R.	4. 巻 59
2. 論文標題 Reconnection heating experiments and simulations for torus plasma merging start-up	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 076025 ~ 076025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab14a4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue S., Miyata Y., Urano H., Suzuki T.	4. 巻 62
2. 論文標題 A new vertical instability predictor via precursor oscillation detection with performance monitoring of equilibrium controller	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086007 ~ 086007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac6c39	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bando T, Honda M, Inoue S, Yoshida M, Matsunaga G, Isayama A, Takechi M, Shinohara K, Sumida S	4. 巻 63
2. 論文標題 Torque to counter-current direction driving low frequency tearing modes in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 115005 ~ 115005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac11b7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue S., Miyata Y., Urano H., Suzuki T.	4. 巻 61
2. 論文標題 Development of JT-60SA equilibrium controller with an advanced ISO-FLUX control scheme in the presence of large eddy currents and voltage saturation of power supplies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096009 ~ 096009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac1260	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cheng C. Z., Inoue S., Ono Y., Tanabe H., Horiuchi R., Usami S.	4. 巻 28
2. 論文標題 Plasma heating and current sheet structure in anti-parallel magnetic reconnection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 072101 ~ 072101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039818	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 BANDO Takahiro, TOJO Hiroshi, TAKECHI Manabu, AIBA Nobuyuki, WAKATSUKI Takuma, YOSHIDA Maiko, INOUE Shizuo, MATSUNAGA Go	4. 巻 16
2. 論文標題 On Collapses in Strong Reversed Shear Plasmas During or Just After Plasma Current Ramp-Up in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1402089 ~ 1402089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1402089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bando T, Wakatsuki T, Honda M, Isayama A, Shinohara K, Inoue S, Yoshida M, Matsunaga G, Takechi M, Oyama N, Ide S	4. 巻 63
2. 論文標題 Effect of $m/n = 2/1$ neoclassical tearing mode on sawtooth collapse in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 085009 ~ 085009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac04bb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bando T, Matsunaga G, Takechi M, Isayama A, Oyama N, Inoue S, Yoshida M, Wakatsuki T	4. 巻 61
2. 論文標題 Experimental observations of an $n = 1$ helical core accompanied by a saturated $m/n = 2/1$ tearing mode with low mode frequencies in JT-60U	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 115014 ~ 115014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab4612	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 井上静雄, 宮田良明, 浦野創, 鈴木隆博
2. 発表標題 改良した等磁束制御手法による JT-60SA平衡制御コントローラーの開発
3. 学会等名 第 36 回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Inoue, M. Okabayashi, Z. Taylor, E.J. Strait, J. Shiraishi, G. Matsunaga, M. Takechi, A. Isayama, N. Hayashi, S. Ide
2 . 発表標題 The physics of locked tearing mode stabilization by rotating 3D fields in the presence of static error fields
3 . 学会等名 61st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Okabayashi, S. Inoue, N. Logan, Z. Wang, Z. Taylor, E. Strait, R. La Haye, J. Hanson, D. Shiraki
2 . 発表標題 MHD Properties of Tearing Stabilized Regime by Rotating External 3d Field in the Presence of Error Field
3 . 学会等名 61st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physic ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Okabayashi, S. Inoue, N. Logan, Z. Wang, Z. Taylor, E. Strait, R. La Haye, J. Hanson, D. Shiraki,
2 . 発表標題 " A promising path of Tearing Mode Entrainment in the Presence of Static Error Field
3 . 学会等名 23rd Workshop on MHD Stability Control ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Inoue, M. Miyata, H. Urano, T. Suzuki
2 . 発表標題 DEVELOPMENT OF JT-60SA EQUILIBRIUM CONTROLLER WITH AN IMPROVED ISO-FLUX METHOD AND VERTICAL DISPLACEMENT EVENTS PREDICTOR
3 . 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 静雄
2. 発表標題 大型超伝導トカマク装置JT-60SAにおけるプラズマ制御手法の開発の現状と今後
3. 学会等名 NIFS共同研究研究会「核融合プラズマの運転制御に関するシミュレーション研究の進展」(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関