

平成 31 年 4 月 26 日現在

機関番号：33910

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13923

研究課題名(和文)磁化プラズマの突発現象の物理モデル

研究課題名(英文)Physics Modelling for Abrupt Events in Magnetized Plasmas

研究代表者

伊藤 公孝 (ITO, Kimitaka)

中部大学・総合工学研究所・特任教授

研究者番号：50176327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽フレアの発生や閉じ込めプラズマのディスラプション等の突発的な発生における本質的な問題は、変形の「成長率が突然増大する」トリガー問題である。

線形不安定性に着目していた慣習を打ち破り、本研究計画では二つの大きなブレイクスルーを得た。(1)非線形不安定性の亜臨界励起によるトリガーの可能性に注目し、測地線音波(GAM)の突発的発生においてそれを実証した。(2)他の突発現象において、トリガー時に急発達するプラズマ変形が、トーラスの一部分に集中した「舌型」変形でありその後モード型摂動に転換することも発見した。これらは従来の常識を覆し、トリガー問題に関わるパラダイムシフトを駆動する成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本計画により、成長率が突発的に急増する現象に新たな物理的描像が得られた。即ち、線形モードを考察するのではなく、亜臨界励起や、「舌型」変形に注目し探査・解析すべきである。トリガー問題にかかわる基本的描像を書き直し、今後の研究の方向に大きな波及効果もたらしたと考える。その成果は、プラズマ物理学の方法論の進展として学術的な意義がある。

更に、突発的豪雨への応用も試行され、また、本研究で得られた学理を応用することによって核融合燃焼プラズマの制御(例えばディスラプション対応)や地球環境問題(例えば太陽フレア爆発の発生の理解)に寄与出来るという社会的な意義がある。

研究成果の概要(英文)：The essential in the abrupt events in hot plasmas (e.g., solar flare, disruption in tokamaks, etc.) is the “trigger problem”, i.e., ‘the growth rate of deformation grows very rapidly’. In this project, contrary to the conventional view that focuses on linear instabilities, we have achieved two major breakthroughs: (1) It was demonstrated that the subcritical excitation of nonlinear instability takes place in the case of abrupt excitation of geodesic acoustic mode in a toroidal plasma. (2) In another type of abrupt event, the plasma deformation in the ‘trigger phase’ was found localized at particular toroidal location (so as to be called ‘tongue’ shape rather than ‘mode’ shape). The tongue deformation turns into mode type deformation later. These achievements are far-beyond conventional view, and induce paradigm shift for the study of abrupt events in high temperature plasmas, and will show strong influences in understanding abrupt events in nature.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：突発現象 亜臨界不安定性 多スケール乱流相互作用 トリガー問題

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

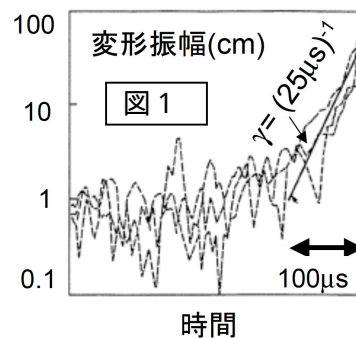
### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 内外の動向と動機付け

太陽フレアの発生や閉じ込めプラズマのディスラプション等の突発的な発生は、地球環境や核融合開発の観点から、極めて重要な問題である。本質的な問題は、変形の成長率が突然増大する事である(引用文献)。これは「トリガー問題」と呼ばれプラズマ物理研究の長い謎になっている。

通常の見方からすると、「プラズマのパラメータが線形不安定性の閾値に近づき、線形モードが不安定となり非線形発展へ移行する」というパラダイムに沿って研究が行われて来た。しかし、それでは突然の発生を理解出来ない。線形成長率は、プラズマ圧力や電流分布や抵抗率等で表現され、それらは大域的な長い時間スケール( $\tau$ と記す)で変化する。安定状態から不安定状態へと移る時、線形成長率 $\gamma$ は(時間微分の最低次の展開項を取って)  $\gamma \sim \gamma_0 t/\tau$  と変化する。(t=0 は系が不安定になる時刻。 $\gamma_0$ は代表的な線形成長率の値。)時刻 t=0 から成長を始める摂動の成長率は  $O(\tau)$ の時間をかけて  $O(\gamma_0)$ に達する。この時間 $\tau$ は平均量の発展時間で決まるので  $\tau \gg 1/\gamma_0$ である。しかしながら、実際の突発現象のトリガーでは、 $1/\gamma_0$ 程度の短い時間で成長率が $\gamma_0$ 程度まで増大する。具体例として、図1にJETで観測された鋸状振動発生時のプラズマ螺旋変形振幅の発展を示す(引用文献に基づく)。プラズマの中心軸が m=1 の螺旋形に変形するが、大きな成長率 ( $1/(25\mu\text{s})$ 程度)は  $100\mu\text{s}$ 未達の極端に短い時間で現れる。突然の出現は現在でも謎である。

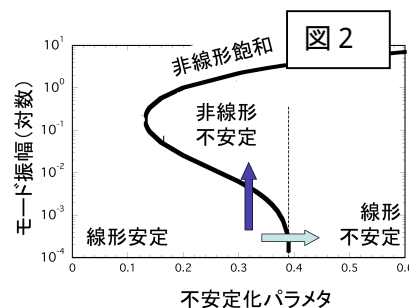
こうした考察から、突発現象の理解には、通常の見方の枠を超えた研究の発展が必須である。「トリガー問題」は、その解明の困難さから、大きなチャレンジに留まっていた。



#### (2) 本計画の着想への経緯

応募者は、レビュー(引用文献)のまとめに参画し、図2に示すような非線形不安定の描像を提案し研究の方向性を示してきた。

最近、観測データが詳細にえられるようになり、データ解析の方法も進展が見られ、従来のものの見方にとらわれず、突発現象の実態を正確に観測・分析できる機運が高まった。一つの例として、井戸らにより、LHDにおける geodesic acoustic mode(GAM)が詳細に観測され(引用文献)、GAMが突発的に励起される現象の詳細な時空データが得られるようになった。申請者は、この現象が「トリガー問題」の例として捉えられるという着想をえた。かねてより、GAM等の摂動がマイクロ乱流を介在として非線形結合するマルチスケール乱流相互作用を定式化している(引用文献)。マルチスケール乱流相互作用により亜臨界不安定性の種が出来る過程を考えれば、突発現象の定量的研究が可能になると着想し、この計画を提案した。



#### (3) 成果の意義

本計画により、成長率が突発的に急増する現象の一つの理論的モデルが得られる。これらを通じ今後の「突発現象」研究の進展に寄与する。その成果は、プラズマ物理学の方法論の進展として意義がある。更に、核融合燃焼プラズマの制御(例えばディスラプション対応)や地球環境問題(例えば太陽フレア爆発の発生の理解)に寄与出来るという意義がある。

### 2. 研究の目的

本計画の目的は、太陽フレアの発生や閉じ込めプラズマのディスラプション等、宇宙や実験室で観測される「磁化プラズマの突発現象」の物理モデルを構築する事である。変動が突発的に発生するトリガー過程を念頭に置き、「突発現象における成長率の急速な増大」の理論を構成する。亜臨界不安定性に着目し、マルチスケール乱流物理学によって非線形不安定性の「種」を研究し、線形理論では安定な系が、突然不安定化される仮説を提示する。今後実験によって「突発現象」の機構を探查する為の物理的描像を提示する事を目標とする。

### 3. 研究の方法

「突発現象」について、「成長率が時間的に速く変化する」という点に焦点を当て、アセスメントを行い、問題を定式化する。非線形不安定性を探索し、線形安定条件の下で、「種」をもとに非線形的に不安定化するための閾値を解析する。マルチスケール乱流結合による亜臨界不安定性の励起過程を解析する。理論・シミュレーションの成果により、突発現象の物理モデルを作り提案する。そして実験観測との比較も試みる。実験家とも協力し、実験観測から「突発

現象」研究に必要なデータ抽出法も研究する。物理モデルに基づき、突発現象の兆しの発見法や制御法への寄与も考察する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 非線形励起の実験的検証

第一のテーマとして、井戸たちによる LHD における「GAM が突発的に励起される現象」を選んだ。(図3の(2)で示されるデータが、GAM の変動振幅であり、図の中央付近で突発的に発生する事が示されている。)このモードは(引用文献)にあるように線形不安定性ではなく、非線形励起される。更に、井戸等の実験では(プラズマを加熱するため)高速粒子がプラズマの中に入射されている。そうした環境では、GAM が非線形不安定性を示し、図2に示す様な特徴がある事を代表者等は理論的に示して来た。理論的に非線形励起のしきい値を求めている。

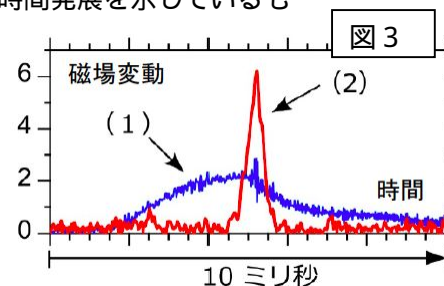
実験家と共同で精密な分析をおこなった。その結果、高速粒子がプラズマの中に入射されているために別の不安定性が発生し(図3で(1)という線で時間発展を示しているもの)

それが非線形効果で周波数を変化させていき、対象とする GAM の周波数の2倍に近づいた時に、発達した不安定性(1)と GAM(2)の間の非線形結合が急速に強まり、突発的に GAM が励起される事を実験的に検証した(雑誌論文)。GAM の成長率が時間的に変化する早さを観測すると、トリガー「問題」の焦点であった如く、「 $1/\gamma_0$ 程度の短い時間で成長率が $\gamma_0$ 程度まで増大する」事が実証され、理論的な説明も与えられた。

実験データの詳細な観測と分析において、非線形結合を実測し、トリガー現象の定量的実測に成功し、それを説明する理論描像をあわせて提示・検証出来た事は大きな成果と言える。トリガー問題を描き理解する一つの典型的な例を提供する事が出来た。

この研究成果は、国際的専門誌に発表されただけでなく、啓蒙雑誌「パリティ」誌の特集「物理科学この一年(2018年)」にも取り上げられ、広く国民に紹介された。

この成果は、典型的な例として、ものの見方を変え、当初提案の研究目標の大きな柱が達成されたと言ってよい。



##### (2) 「非モード型」摂動の突発的励起の発見

上記 GAM の突発的発生に平行して、トラスプラズマの多種の突発現象を対象として、トリガー問題にかかわる実験データを博搜した。その結果、従来のものの見方を根本から変える知見を得る事に成功した。

共同研究者の居田たちによって、LHD プラズマで突然  $m/n \sim 1$  ( $m$  と  $n$  はポロイダルおよびトロイダルモード数)の大規模変形が発生する過程が研究されていた。(図4に代表的な例を示す。磁場変動が図の中心付近の時刻で突発的に成長して大振幅振動が生まれている。)

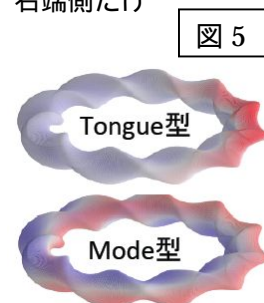
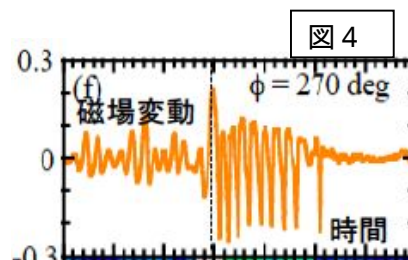
代表者は、データ解析を精密に行った結果、(i)図4で最初に大変動が発生するトリガー部分で発達する摂動が通常の MHD モードでは無い事、(ii)そしてトリガー部分では、トロイダル方向に局在した変形が極端に短い時間に発生・発達する事を見いだした。

この結果に基づき、研究協力者の実験家(居田たち)が詳細に分析し、(iii)トリガー部分ではトロイダル方向に局在した変形(図5・上で tongue 型と記す様な、右端側だけ

に集中したパターンの摂動)が極端に短い時間に突然成長し、(iv)ある程度の時間を経て、それが通常の MHD モード(図5・下、mode 型と記すようにトラス全体を巡るパターン)に転化する事を確認した。(v)なお、実験家がタング(舌)型変形と呼ぶのは、トリガー時に発達する成分がトロイダル方向に局在し「舌」のように突き出るイメージからである(雑誌論文、)。

タング(舌)型変形は非線形励起の最たるもので、従来広く探査されていた線形 MHD モードの枠の中には含まれていない。線形モードが不安定化するという従来の描像を根本から覆す発見となった。

この研究経過は、当初の研究目標を大きく超える成果となった。従来の研究は、MHD モード理論の中で、線形不安定性を捜していた。なぜ、今まで「トリガー問題が解けなかったか」という問いに対して、捜すべきものが違っていた事が一つの原因であった事が分かった。実験



的に探査すべきパターン（の一つ）が発見された事は、トリガー問題解決の方向を示す成果である。

啓蒙雑誌「パリテイ」誌の特集「物理科学この一年(2017年)」で紹介されたほか、新聞などでも取り上げられた。物理学会では、プラズマ分野を超えた広い研究分野のトリガー問題を扱うシンポジウムが企画される等、広汎な波及効果が示された。

国際的發展にも努めた。中国 HL-2D 装置でも、ELM(edge localized modes)にこの考え方と解析法を用いた共同研究を行った。その結果、Type-III ELM と呼ばれる一群の突発現象がトリガーされる時には、ストリーマーという非線形モードが爆発的に励起される事を実験的に見いだした。Type-III ELM 発生の鍵を握るダイナミクスを発見し、論文を投稿中である[J. Cheng, et al: (2019)]。

### (3) 広い自然現象への応用

研究期間延長中には、「突発現象が線形不安定性の単純な成長ではない」という本研究計画で実証された描像を広い自然現象へ応用する事が出来ないかとの着想も検討した。一例として、「ゲリラ豪雨」の様な突発的に強雨が起きる問題を考察した。濃尾平野の具体的データの例について統計分析を実行し、強雨が時間的・空間的にどのように発生・発展するかを解析した。その結果、あるしきい値を超えた強雨に着目すると、強雨域が、地図上で「弾道的」に伝播する事を見いだして論文として投稿した[佐々木、杉田、他：投稿中(2018)]。今後ゲリラ豪雨を予測する方法の基礎として寄与するものと期待される。

### (4) 研究の波及効果

「萌芽的」研究プロジェクトにふさわしく、革新的な当初のアイデアが検証された事に留まらず、トリガー問題で現れるプラズマ変形がモード型変形ではない事を見出し従来の常識を覆した事は、当初目的達成とあわせて、トリガー問題に関わるパラダイムシフトを駆動する成果となった。トリガー問題にかかわる基本的描像を書き直し、今後の研究の方向に大きな波及効果をもたらしたと考える。

### < 引用文献 >

- S.-I. Itoh, K. Itoh, et al., Plasma Phys. Contr. Fus. **40**, 879 (1998)  
T. Ido, et al., Nucl. Fusion **55**, 083024 (2015)  
P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh, et al., Plasma Phys. Contr. Fus. **47**, R35 (2005).

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] (計 7 件)

K. Itoh, (2 名), T. Yamada, (1 名): “Symmetry-Breaking of Turbulence Structure and Position Identification in Toroidal Plasmas” Plasma and Fusion Research - Review Articles, **13** (2018) 1102113, (16 pages) 査読あり DOI: 10.1585/pfr.13.1102113

K. Ida, (5 名), K. Itoh : “Exhaust of turbulence cloud at the tongue shaped deformation event” Nucl. Fusion **58** (2018) 112003 (5 pages), 査読あり <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aab971>

K. Ida, (5 名), K. Itoh, S.-I. Itoh: “Trigger mechanism for the abrupt loss of energetic ions in magnetically confined plasmas”, Scientific Reports (2018) 8:2804 (8pages) 査読あり DOI:10.1038/s41598-018-21128-z

K. Ida, (5 名), K. Itoh: “Observation of distorted Maxwell-Boltzmann distribution of epithermal ions in LHD”, Physics of Plasmas **24**, 122502 (2017); (6pages) 査読あり <https://doi.org/10.1063/1.4999644>

T. Ido, K. Itoh, (12 名): “Observation of subcritical geodesic acoustic mode excitation in the large helical device”, Nucl. Fusion **57** (2017) 072009 (9pages) 査読あり <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa665a>

K. Ida, T. Kobayashi, K. Itoh, (7 名): “Abrupt onset of tongue deformation and phase space response of ions in magnetically-confined plasmas” Scientific Reports **6** (2016) 36217 (8pages) 査読あり doi:10.1038/srep36217

K. Itoh, S.-I. Itoh, K. Ida, Y. Kosuga: “On magnetic signals of a large-scale quasi-electrostatic perturbation”, J. Phys. Soc. Jpn **85** (2016) 094504 (4page) 査読あり

〔学会発表〕(計 5 件)

J.Cheng, J.Q.Dong, K.Itoh, (19 名): “Pedestal dynamics in inter-ELM phase on HL-2A tokamak”  
27th IAEA Fusion Energy Conference (2018)

Takeshi Ido, (2名), Kimitaka Itoh, ( 8 名 ): “Energetic particle-driven Geodesic Acoustic Mode in the Large Helical Device”, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics Sept. 18-23 (2017)

K. Ida, T. Kobayashi, K. Itoh, (7 名) : “Abrupt onset of tongue deformation in LHD plasmas”  
1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics Sept. 18-23 (2017)

K.Ida, (5名), K.Itoh, S.-I.Itoh: “Interaction between resonant and non-resonant MHD: A trigger mechanism of collapse of magnetically confined plasmas”, International Toki Conference (2017)

J. Q. Dong, J. Cheng, K. Itoh, (25 名): “Observation of Streamer as a Trigger for ELMs on HL-2A Tokamak”, Asia Pacific Transport Working Group (2017)

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：山田 琢磨

ローマ字氏名：(YAMADA, Takuma)

所属研究機関名：九州大学

部局名：基幹教育院

職名：准教授

研究者番号(8桁)：9 0 4 3 7 7 7 3

研究分担者氏名：杉田 暁

ローマ字氏名：(SUGITA, Satoru)

所属研究機関名：中部大学

部局名：中部高等学術研究所

職名：准教授

研究者番号(8桁)：2 0 6 5 0 7 0 8

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：居田 克巳

ローマ字氏名：(IDA, Katsumi)

研究協力者氏名：井戸 毅

ローマ字氏名：(IDO, Takeshi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。