

## トラスプラズマにおける自己組織化の機構とその応用

Mechanism and application of self-organization processes in torus plasmas

代表研究者 広島大学理学部物性学科助手 草野 完也  
Dept. of Materials Sci., Faculty of Sci., Hiroshima Univ.  
Kanya KUSANO

Self-organization is a nonlinear process where a physical state spontaneously reforms itself to the most stable state through unstable processes. Self-organization processes in a torus plasma are investigated by numerical simulations. First, the phase dynamics in the self-organization process of the reversed-field pinch plasma is analyzed in detail. So, it is unveiled that the nonlinear coupling of the most unstable two kink modes entirely governs the phase dynamics in the self-organization process of the torus plasma. Secondary, stability analyses are carried out about 'DAG' state which is a new fusion system designed to confine high temperature plasma using a self-organization process. Finally, the physical mechanism for the self-organization processes in space plasmas is studied. Especially, we conclude that the solar flare can be explained as a similar self-organization process to fusion plasma.

### 研究目的

トラスプラズマによる核融合研究は 21 世紀におけるエネルギー源として注目を集めている。しかし、さまざまな不安定性と大きな拡散の存在が、その研究開発を初期の予想に反して非常に困難なものにしてきた。核融合プラズマの研究はプラズマ不安定性研究の歴史であるといっても過言ではない。プラズマの不安定性研究は当初その線形解析にのみ主眼がおかれていた。これは線形解析が一般に固有値問題として実現できるという研究手法の容易さによると思われる。それゆえ、核融合プラズマのデザインは線型不安定モードを極力有しない配位の模索に他ならなかった。

しかし、現実のプラズマを理論的に解析する場合、不安定性の非線形ダイナミクスを無視することはできない。特に、近年の計算機シミュレーションによるプラズマダイナミクスの非線形解析の結果、'自己組織化'と呼ばれる非線形過程が核融合プラズマにおいても重要な働きをもつことが明らかにされた。すなわち、ある種の不安定性はその非線形的発展過程の結果として閉じ込め磁場配位を安定化する作用をもつことが分かった。そ

れ故、核融合プラズマのデザインにおいては単に線形の解析のみに頼るのではなく、さらに非線形ダイナミクスの影響をも考慮する必要性が生じる。

本研究は計算機シミュレーションを駆使した理論解析によって、トラスプラズマの非線形ダイナミクスを詳細に調べ、特に自己組織化の物理機構を解明することをめざす。さらに、その成果を踏まえて自己組織化過程をプラズマ閉じ込め実験に積極的に応用する方策を探る。また、核融合プラズマと自然界のプラズマの類似性に注目し、自己組織化によるプラズマ現象の統一的な理解を得ることを試みる。

### 研究過程

本研究は三つの個別研究から構成されている。第 1 は RFP を念頭においたトラスプラズマにおける自己組織化過程の非線形ダイナミクスの詳細研究、第 2 は自己組織化を応用した新しい核融合プラズマシステム 'DAG' の理論研究、第 3 は自己組織化に基づく太陽フレア、天体ダイナモなど自然界のプラズマ非線形現象の物理機構の解明である。いずれの研究も磁気流体モデルを用いた計算機シミュレーションによる研究として実行さ

れた。第1の研究はキンクモードのフェーズダイナミクスを理論的に解析し、実験的に観測されているフェーズのロッキングを説明した。この結果から、自己組織化における非線形結合の描線を描くことができた。第2の研究は'DAG'と呼ばれる新しい閉じ込め配位の安定性を調べることを中心に行った。この結果からDAGがRFPに比べ安定性に優れた配位であることを示した。ただし、計画していたDAGの配位形成に関するシミュレーション研究は時間の都合上、実現できなかった。第3の研究では2次元系における磁気アーケード配位の自己組織化を平衡解析とダイナミックシミュレーションを用いた調べた。この結果、核融合プラズマの研究で見出された自己組織化におけるエネルギー緩和理論によって太陽のフレア現象などが説明できる可能性があることが示された。

## 研究成果

### ①非線形システムにおけるキンクモードのフェーズダイナミクス

RFP（逆転磁場ピンチ）プラズマ実験においては、放電の初期またはその過程で不安定性の成長とエネルギーの緩和による安定配位の自己組織化が観測されている。その際、複数の不安定モードがトラス上の1点で同じ位相（フェーズ）をもつ事実が知られている。本研究ではこのフェーズ・ロッキングを計算機シミュレーションによって数値的に実現するとともに、そのメカニズムを解明した。計算は円柱系でおこなわれ、キンクモードに不安定である平衡配位に擾乱を加えることにより開始された。この結果、フェーズロッキングは平衡配位が複数のモードに同時に不安定である時にのみ必ず生じることが見いだされた。さらに、ロッキングの生じる位置は最も不安定である二つのモードの位相が一致している点で与えられることが分かった。この事実は複雑な非線形結合過程において、最も不安定なモードがダイナミクスを統轄していることを示唆している。我々はこの事実を直接確認するため、各モードの結合の強さをすべて計算し、図示した。この結果、最不安定モードよりも波長の短いモードはより波長の

長いモードと、波長の長いモードはより波長の短いモードと強く結合していることをつきとめた。それゆえ、この非線形結合構造によって最不安定モードが全てのモードのダイナミクスを統轄していると結論づけることができる。また、フェーズロッキングはプラズマにおける磁気流体的自己組織化の一般的な特徴であることも示した。おそらく、この事実は自己組織化過程においてプラズマのダイナミクスがエネルギー緩和効率を自発的に最大にすることと関係していると考えられる。

### ②自己組織化を用いた新しい核融合システムの開発

RFPは自己組織化を利用したプラズマ閉じ込め配位の代表であるが、不安定性モードの成長の際、プラズマ壁相互作用が激しく現れ、閉じ込め性能が低下する欠点をもつ。この欠点を改善したシステムがDAGである。DAGはプラズマ壁相互作用を抑止するダイバータを有する一種のRFPと考えることができる。DAGの優れた点はダイバータが工学的に付加されたシステムではなく、主プラズマと一体となったシステムとして与えられている点にある。すなわち、DAGにおいてはエネルギー緩和理論による最低エネルギー配位自身がダイバータを有している。それゆえ、ダイバータ配位が自発的に形成される可能性を持っている。

本研究においてはDAG配位のキンクモードに対する安定性を緩和法を用いて調べ、RFPのそれと比較することを行った。この結果、DAGは2割程度RFPに比較して安定化効果を有することを示した。この結果はダイバータの存在が磁気流体的な安定性にも寄与することを示している。これはセパトリックスにおいて磁気シアが非常に大きくなるためであると考えられる。

### ③自然界における自己組織化現象の機構解明

核融合プラズマは特殊なプラズマ閉じ込め配位によっているにも関わらず、多くの点で自然界におけるプラズマ現象と深く関わりを持っている。特に、太陽プラズマにおけるフレア現象はトラスプラズマによく似たアーケード形状の磁場構造のもとで発生する不安定性であるため、核融合プ

ラズマとの物理的類似性をもつと考えることができる。本研究では太陽フレアがRFP同様のエネルギー緩和による一種の自己組織化過程であるとの仮説に基づき、太陽フレアの機構解明を行った。第1にエネルギー緩和理論に基づいて2次元矩形断面をもつ磁気アーケードの最小エネルギー配位を求めた。その結果、磁気ヘリシティの大小によってトポロジカルに異なる複数の磁気アーケード配位が存在することが見いだされた。磁気ヘリシティが小さな場合、全ての磁束面が太陽光球面に到達する単純なアーケード配位が最小エネルギー状態を与える。しかし、磁気ヘリシティがある量を超えるとアーケードは二つに分離し、光球面に接続しない磁気島構造が出現する。この結果は太陽大気内になんらかの機構によって磁気ヘリシティが供給され続けた場合、ある量以上の供給があると磁気アーケードの最結合が生じ、大量のエネルギー解放が生じることを示唆している。第2に光球面におけるプラズマのシア運動がヘリシティ供給の機構であると考え、ヘリシティ供給過程における磁気アーケードのダイナミクスを数値シミュレーションによって調べた。この結果、最小エネルギー配位が単純なアーケード構造を持つ場合は、シミュレーションの結果は最小エネルギー解に極めて近いことが分かった。これは自己組織化過程の結果である。しかし、最小エネルギー配位が磁気島構造を有する程度に磁気ヘリシティを供給したとしても、上で予言された磁気最結合によるアーケードの分離とエネルギーの解放は見いだすことができなかった。これはシミュレーションが2次元系においてなされたためであると考えられる。それゆえ、フレア現象の機構解明においては3次元効果を含めた解析を行う必要がある。

#### 今後の課題と発展

本研究の結果、トラスプラズマにおける自己組織化の機構解明はほぼ完成したと考えることが

できる。ただし、当初予定していたその応用に関する研究は残念ながら十分進展したとは言いがたい。今後は自己組織化を積極的に利用した核融合システムのデザインを考案するとともに、これまで培われた数値実験の手法をもとにそのデザインの有効性に関する理論的検証を綿密に行う必要がある。DAGはその一例である。DAGに関しては今後は不安定性解析のみならず、非線形ダイナミクスの研究を進める予定である。本年度は遂行できなかったが、自己組織化を用いた新しい電流駆動法の数値的研究にも着手する必要がある。

前記したように核融合プラズマは太陽プラズマなど自然界のプラズマと深く関係している。それゆえ、実験室のみならず自然界にも研究の視点を広げ、プラズマダイナミクスにおける自己組織化の物理について統一的に研究する必要があると考えている。フレアメカニズムの研究はそのための良い例である。さらに、磁気エネルギーだけではなく運動エネルギーまでも含めた新しい自己組織化のより統一的な理論点枠組みを見いだす必要性もある。この為には自然界におけるダイナモプロセス（磁場生成過程）をも取り込んだ自己組織化の研究を行う必要がある。こうした広い視野に立った核融合研究が21世紀における新しいエネルギー源を獲得する早道になると私は考えている。

#### 発表論文リスト

- 1) K. Kusano, T. Tamano and T. Sato: MHD Simulation of the Toroidal Phase locking Mechanism in a Reversed-Field Pinch Plasma, *Nuclear Fusion*, 31(10), 1923 (1991).
- 2) K. Kusano, H. Kubo, T. Tamano and T. Sato: 'Solar Flare Mechanism Based on MHD Relaxation Model', Proc. of 1992 Int. Conf. Plasma Physics, Innsbruck, June, 1992.
- 3) K. Kusano, Y. Suzuki and T. Sato: 'Energy Conversion Processes in Starting-up Phase of Externally Driven Reconnection', *Phys. Fluids B*, 9(1993) (to appear).