

プラズマにおける自己組織化現象

核融合科学研究所
堀内 利得

1. はじめに

自然界には様々な階層での秩序構造が存在する。例えば、生命体や天体の存在がその典型的な例である。これらの秩序構造はどのような機構で形成され、時間経過とともにどのように変化していくのだろうか。熱力学第2法則によると、自然界における熱現象は常にエントロピーの増大する方向に進む。即ち、今存在する秩序だった構造も、時間と共に消滅し、無秩序な状態“混沌”へと発展していくことを意味する。一方、地球双極子磁場の自発形成過程の例に見られるように、ローカルなエネルギー源と非線形相互作用が存在するときには、例え、初期に混沌とした状態にある系においても、自発的に秩序ある空間構造が形成・維持される現象がしばしば観測される。これらの現象は、一般に自己組織化と呼ばれ、広い学問分野で研究されている。そのため、自己組織化という概念は非常に広い内容を包含しているが、ここで議論する自己組織化過程とは、ある混沌とした状態（無秩序な状態）にある系が、非線形相互作用を介して、自発的に、単純で秩序ある空間構造を持つ状態（自己組織化状態）へ遷移していく過程をいう。

ここでは、物理系、特に、プラズマにおける自己組織化過程に注目する。自己組織化現象を考える上で重要となる概念として、系の開放性と散逸性がある。今注目している系は、それを取り巻く環境との間で、質量やエネルギー等の様々な物理情報のやり取りをしており、エネルギーの系内部への注入方法や系内部で形成された不要物（エントロピー）の排出方法によって、系の構造形成・維持機構に大きな変化をもたらされることが考えられる。また、自己組織化する系では、その時間発展が微小散逸項を含む非線形偏微分方程式で記述されており、この散逸性の存在が、系が自己組織化する上での鍵要素となっている。以下では、シミュレーションの実例を示しながら、この開放性と散逸性に注目してプラズマの自己組織化現象を解説する。

2. エネルギー緩和と散逸構造の分岐

ここでは、まず、初期に系の応答時間よりも早い時間スケールでエネルギーを注入することにより高いエネルギー状態に置かれた系の時間発展を調べたシミュレーション研究を紹介する。モデルとして、角柱状の完全導体容器内に閉じ込められた磁気流体プラズマを考える。角柱の両端は周期境界条件によって結ばれており、シミュレーションの開始以後、系外とのエネルギーのやり取りは存在しない。図1はシミュレーションの結果で、磁場の等値面の時間発展を示している。初期の高エネルギー平衡状態に微小摂動を与えると、電流駆動型の不安定性（キンク不安定性）が誘起され、磁束管のヘリカル状の変形を作り出す。この不安定性の非線形発展により磁束管同士が接触した所に電流の異常集中が起き、散逸過程を通じて磁力線のつなぎ変え、“磁気リコネクション”が誘発される。この過程で磁場構造（磁場のトポロジー）の急激な変化が起こる。ここで、非常に興味深いのは、時間経過とともに、系が混沌とした中間状態を経て、自発的に簡単でかつ秩序あるヘリカル状の磁場構造へと遷移している点である。まさに、プラズマ中で自己組織化現象が発生したことを示している。

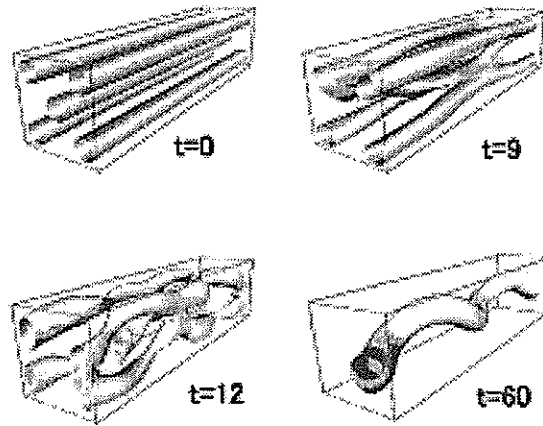


図1. 磁気流体プラズマの自己組織化による磁場構造の変化。磁場の長軸方向成分の等値面を示している。

このプラズマ中で発生した自己組織化過程の物理描像を明らかにするために、非散逸極限における2つの保存量、即ち、全磁気エネルギー ($W = \int d^3x (\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}) / 2$) と全磁気ヘリシティ ($K = \int d^3x (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})$) を導入する。ここで、 $\mathbf{B} (= \nabla \times \mathbf{A})$ は磁場を、 \mathbf{A} はベクトルポテンシャルを表す。磁気ヘリシティは、磁力線の結合状態を示す物理量であり、例えば、磁気フラックス値 ψ_l と ψ_p を持つ無限小断面の2つの磁気フラックス管が鎖状に結合した場合、 $K = \psi_l \psi_p$ で与えられる。圧力 P が磁気圧 $(\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}) / 2$ に比べ十分小さく、流速が存在しないとき、理想磁気流体近似 (非散逸極限) の下で、全磁気エネルギーと全磁気ヘリシティは、時間によらない保存量となる。この系に微小電気抵抗値 η による散逸項を導入すると、これらの物理量は、次式のように電気抵抗値に比例して減少していく。

$$dW / dt = - \int d^3x \eta (\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}) \quad (1)$$

$$dK / dt = - \int d^3x \eta (\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}) \quad (2)$$

図2に、この2つの物理量の時間変化を示す。今、磁場の初期配位として係数 $\lambda =$ 一定の無力磁場 (force-free) 条件 $\mathbf{J} = \lambda \mathbf{B}$ を満たす配位を仮定すると、両者とも同じ率で減少していく。即ち、電気抵抗により磁場強度や電流値の減少はゆっくりと進行するが、無力磁場配位を満たしている限り、この2つの物理量の散逸率に差は生まれない。図2に示されたシミュレーションの初期 ($0 < t/t_A < 18$) がこの状態に対応する。ところが、図2から判るように、 $18 < t/t_A < 24$ および $38 < t/t_A < 45$ において、磁気エネルギーの急激な減少が発生する。その一方、磁気ヘリシティのカーブは同じ時点で傾きが緩やかになり、より保存性の良い配位へと変化していることがわかる。図1で見たように、急激なエネルギー緩和が起こるこの時期は、磁束管同士が磁気リコネクションを通じて融合し、磁場構造に大きな変化が起きている時期に対応する。即ち、系の非線形発展と磁気リコネクション機構の存在が2つの物理量の散逸に大きな差、“磁気エネルギーの選択的散逸”、を作り出した原因である。別の言い方をすると、例え初期に同じ散逸構造を持っていたとしても、ダイナミカルな非線形発展の結果、2つの物理量の間全く異なる散逸構造が形成され、選択的散逸が実現することを意味する。図3により、この過程を見る。シミュレーションの初期に同じ散逸率であったものが、磁気リコネクションが支配的に進行する時期になると、2つの物理量の間大きな差が生まれる。即ち、磁気エネルギーの散逸率の急激な増加と磁気ヘリシティの散逸率の減少が非常に短い時間のエネルギー緩和相で発生しているのが判る。このような散逸構造の分岐現象は、散逸構造が初期条件によって一律的に決定されるのではなく、自己組織化状態へ最も効率的に到達するためのプラズマの自発的な行為として、非線形発展の過程において新たな散逸構造の形成が行われていることを意味する。

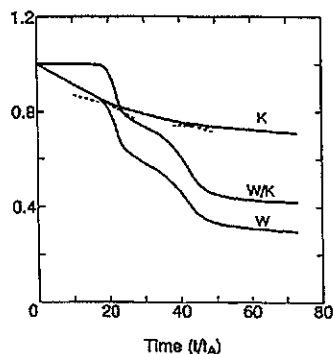


図2. 全磁気エネルギー(W)と全磁気ヘリシティ(K)の時間変化。

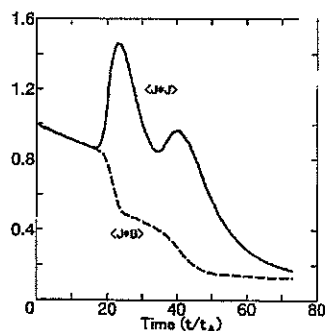


図3. 磁気エネルギーの散逸率 ($\langle J \cdot J \rangle$) と磁気ヘリシティの散逸率 ($\langle J \cdot J \rangle$) の時間変化。

このようにして、エネルギー緩和が短い時間スケールでの急激な構造変化を伴って間欠的に繰り返して発生することにより、最終の秩序構造を持った安定な平衡配位が実現される。

散逸構造は、問題にしている物理量の空間構造に対応する波数空間スペクトルによって表すことができる。従って、散逸構造の分岐は、これら2つの物理量の波数スペクトルに全く異なった遷移が発生することを意味する。物理量の散逸率は、そのスペクトルの平均波数の2乗に比例した形で与えられるので、自己組織化系では、磁気エネルギーのスペクトルに高波数領域に遷移する順カスケード現象が発生し、磁気ヘリシティのスペクトルに低波数領域に遷移する逆カスケード現象が発生する。このように、プラズマ中で順カスケードと逆カスケードが同時に起こることにより、選択的散逸のための散逸構造が形成され、拡散時間より十分短い緩和時間スケールで自己組織化状態が実現する。

3. 自己組織化における間欠性と回帰性

次に、外部から恒常的にエネルギーが流入している系内で起こる自己組織化現象のシミュレーションを紹介し、短時間にエネルギー流入が起きた上述の例と比較する。シミュレーション領域は角柱形状をしており、4つの側面境界は完全導体とし、上下方向の2つの境界ではエネルギーを供給するための条件を置く。磁場は、初期に開放端方向の向きに様に与え、上下境界の円形状の小領域に回転運動を与えることにより磁力線を通じて系内にエネルギーをアルベン波の形で注入する。このモデルは、太陽フレアでのエネルギー解放機構として提案されている、磁力線ループモデルを単純化したものであると見ることもできる。図4は、上下境界の回転領域(点線)内の6点から出発した磁力線の時間的发展を示している。境界面でのプラズマの回転運動により磁力線ループ内に電流(磁力線のねじれ)が蓄えられていく。ある臨界値を超えるとキンク不安定性が発生し、磁力線ループにヘリカル状の変形が生まれる($t = 12.8t_A$)。この時点では、まだ上下両境界から出発した磁力線ループは重なり合っており、磁場構造に大きな変化は見られない。さらに変形が進むと捩れ変形を受けていないループ外部の一様磁場との接触面で電流集中が起き、ループ磁場と一様外部磁場との間で磁気リコネクションが誘発される。この結果、2つの磁気ループは分離し、磁力線の反対境界面に到達したときの位置は出発時より外側へとシフトする($t = 14.0t_A$)。即ち、磁気リコネクションにより磁場トポロジーに変化が起きたことを示している。この過程で、境界面での回転により磁力線ループ内に蓄えられたエネルギーがループの外側に放出され、磁力線の捩れが緩和される。非常に興味深いことは、このような磁気リコネクションによる構造変化を繰り返した後に、磁力線ループが重なり合った元の状態に再び戻るという点である($t = 26.0t_A$)。図5はこの磁力線トポロジーの変化を、反

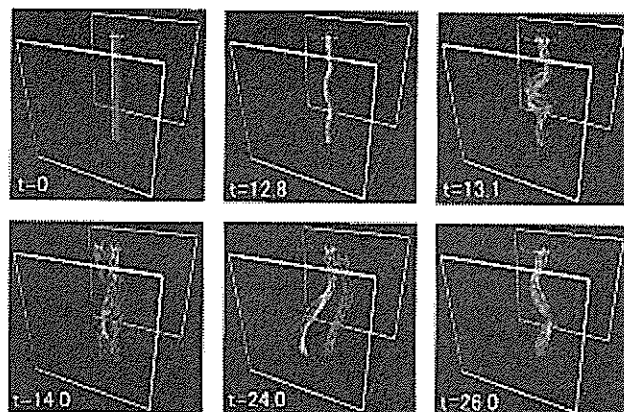


図4. 上下境界面の回転領域(点線)内から出発した磁力線の時間発展。赤が下面境界から、緑が上面境界から出発した磁力線を表す。時間はアルベン時間で規格化してある。

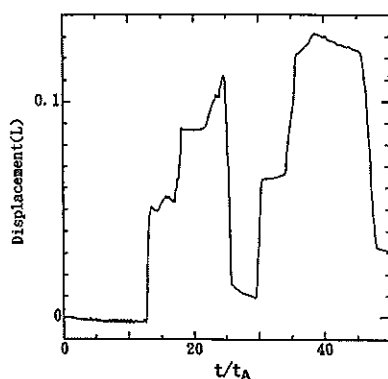


図5. 上端境界から出発した磁力線が下端境界に到達したときの位置(中心からの半径)のずれの時間変化。

対境界面に到達したときの磁力線の位置のずれを用いて表している。特徴的なことは、磁気リコネクションにより磁場トポロジーの変化が決して連続的に発生するのではなく、間欠的かつ短い時間スケールでバースト的に起こるといふ点である。これは、短時間にエネルギー流入が起きた前章の例と類似している。さらに、ここで注目すべき重要なことは、磁力線の位置のずれが、間欠的に増加していくばかりでなく、ある時突然減少し、ほぼ元の値に近い状態に戻るといふ点である。即ち、磁場構造の変化に回帰性が見られることを意味する。これは、図4で磁力線ループが重なり合った元の状態に戻った事実に対応している。前章で示したシミュレーション例と異なり、恒常的なエネルギー供給のある系では、安定な平衡状態は存在せず、再び、磁気リコネクションによる間欠的かつ回帰的な構造変化を繰り返す。このように、系外から恒常的にエネルギーが流入した時に起こる自己組織化現象の特徴は、エネルギー解放と構造形成に間欠性と回帰性を示す点である。

4. まとめ

自己組織化する系では、安定な秩序構想を持った状態へ最も効率的に到達するためのプラズマの自発的な行為として、非線形発展の過程を通じて散逸構造に分岐が起き、磁気エネルギーの選択的散逸が誘発される。また、外界からのエネルギー摂取形態の違いで自己組織化の発展形態に大きな

差が生み出される。系が応答する時間よりも早い時間スケールで系内にエネルギーを注入した場合は、急激なエネルギー緩和を繰り返した後に、安定でかつ秩序ある構造をもった自己組織化状態に落ち着く。これに対し、定常的にエネルギーを供給した場合には、間欠的でかつ回帰的な構造変化を繰り返すが、決して安定な平衡状態へ緩和することはない。