

特別講演 プラズマ閉じ込めとカオス

京都大学ヘリオトロン核融合研究センター

若谷誠宏

§ 1. はじめに

核融合反応により重水素からエネルギーを取り出すために、高温プラズマを磁場により閉じ込めてそれを実現する方式の研究が進んでいる。プラズマは磁力線方向には動き易いために、トーラス磁場にして端損失をなくす方向が自然である。

プラズマを閉じ込めるためには、磁気面と呼ばれている1本の磁力線により織りなされる面が、1つの磁気軸のまわりに入れ子状となっている必要がある。三次元空間に磁場を発生してこのような条件を満足できるようにするための研究がまず必要になる。軸対称トーラスでは、トカマクに代表されるように、プラズマ電流を流しそれにより発生する磁場とトーラス方向の磁場を重ね合わせると実現できる。核融合炉の立場からは、プラズマ電流はそれを維持するためのエネルギーが付加的に必要なことと、内部ディスラプションと呼ばれる緩和振動を含めて電流駆動型不安定性の原因となるために、ない方がよいと考えている。内部ディスラプションはプラズマの内部エネルギーの急減少を伴うために、カオスが関与していると考えられるモデルがある (§ 4)。

トーラス方向に電流を流さずに磁気面を形成できるかどうかは理論的に興味がある問題であると同時に、ハミルトン系のカオスの1例でもある (§ 2)。京都大学において研究を進めているヘリオトロンEは外部のヘリカル形状のコイルと垂直磁場発生コイルで磁気面を形成し、プラズマを閉じ込めている。ヘリオトロンEのような非軸対称トーラスは常に磁力線のふるまいがエルゴディックである領域がプラズマ周辺にあり、これがプラズマの輸送現象とどのように関係しているかは現在もっとも興味がある研究課題である。磁力線のふるまいがエルゴディックになるのは、装置製作の誤差によるエラー磁場やプラズマ不安定性によっても生じることが知られている。内部ディスラプションはこの例である (§ 4)。

プラズマの輸送現象は常に異常輸送であり、クーロン衝突に基づ

く古典的あるいは新古典的輸送に比べて約10倍から100倍程度大きい。この原因として、磁場構造ではなく、プラズマが乱流状態になっていてその結果輸送が大きくなっているとする立場と磁力線がエルゴディックなふるまいをし、プラズマ閉じ込めの機能が悪化することによると考える立場がある。それぞれ実験データと対応している理論的モデルがあり、結論はまだまだ先のことであるが、ここでは後者の立場を支持するようなTEXTトカマクの実験を紹介する(§5)。ここで、理論的モデルを考える場合の基本となるのは、一部の磁力線がエルゴディックなふるまいをする不完全な磁気面における粒子拡散の問題である(§3)。ここではテスト粒子の拡散を議論することになり、プラズマの拡散を矛盾なく取り扱うモデルとは異なることに注意しよう。不完全な磁気面とプラズマ相互作用を考慮した輸送理論はトーラスプラズマの物理の難問の一つであり、研究は初歩的なものに限られている。

非軸対称トーラスにおける興味ある問題は、最近の理論的予測によるとプラズマがない場合に不完全な磁気面であったものが、プラズマが閉じ込められることにより破壊が修復される可能性があることである。Healing effect と呼ばれ関心を集めているテーマの一つである(§6)。

プラズマ閉じ込めにおけるカオスは 現在のところ断片的に研究されている段階であるが、その重要性は今後増してくると予想している。

§2. 磁力線の閉じ込め

プラズマを有限の領域に閉じ込めるためには、まず磁力線を追跡した時に有限の領域内に存在することが必要である。その上でMHD平衡を満足するためには、 $B \cdot \nabla P = 0$ が成り立つ必要があり、磁力線が一枚の面を織るようになってなければならない。この面を磁気面と呼び、 $\Psi = \text{一定}$ と表して、圧力Pが Ψ の関数であればよい。

磁力線のふるまいは $\nabla \cdot B = 0$ より磁束が保存するために、ハミルトン系のカオスの例になっていることはよく知られている。トカマクのように軸対称トーラスでは、磁気面の存在は簡単に証明されるが、ヘリオトロンのような非軸対称トーラスでは、磁気面が

入れ子状に形成されるかどうか分からない。KAM定理からは否定的であり、非軸対称トーラスには intrinsic stochasticity が存在する。しかし、磁場発生用コイルをうまく設計すれば高精度の磁力線追跡計算を行っても磁力線のエルゴディックなふるまいは見られない。最近、磁場計算法の進展により西ドイツのマックスプランク研究所の W VII - X 装置のようなモジュラーコイル方式で磁気面が形成されている装置設計例がある。

また電子ビームを磁力線方向に発射して、その軌跡を蛍光分布で観測するような計測技術の発展により、磁気面の測定もかなりの精度でできるようになっている。W VII - A S 装置では、測定と計算がよく一致した結果を得ている。磁力線のカオスが実験的に調べられるようになりつつある。

§ 3. 不完全磁気面における粒子拡散

非軸対称トーラスでは、intrinsic stochasticity が存在するが、この他には装置製作上の誤差磁場、装置設置時の誤差磁場、あるいはプラズマの電磁的不安定性により、stochasticity が発生する。実際の装置では、磁気面が完全に破壊された状態ではなく、磁気面が部分的に壊れているか、あるいは破壊の程度が空間的に不均一な状態が問題になる。このような磁場にプラズマを閉じ込めるとどのようなようになるかを調べる方法の一つに、モンテカルロシミュレーションがある。トカマクのような磁気面が存在するところに、共鳴的な摂動磁場を加えつつ、モンテカルロシミュレーションにより磁力線を横切る拡散係数を求めることができる。 B_0 をトロイダル磁場として、摂動磁場が $\tilde{B}/B_0 \sim 10^{-4}$ になれば、輸送係数は古典あるいは新古典拡散に比べてかなり大きくなる。1 テスラーに対して、1 ガウス程度で異常輸送が発生することになる。この例でわかるように、実験で見出されている異常輸送の理論的モデルとして、プラズマ乱流に基く乱流輸送とともに磁力線のカオスに原因を求める考えも有力であることがわかる。

モンテカルロシミュレーションはテスト粒子の運動に着目しているが、プラズマが磁場構造と相互作用する可能性を無視しているので、目安になるが定量的ではない。プラズマの運動と磁場の乱れを self

-consistentに取扱い、同時にカオスの影響を考慮するモデルが最終的なものと考えられるが、まだ理論的モデルとしては確立していない。

§ 4. 内部ディスラプションと磁力線のカオス

プラズマのダイナミックスと磁力線のカオスが重要な役割をしていると考えられる現象に、sawtooth oscillations がある。最初に、トカマクのプラズマ中心付近の軟 X 線の測定結果に見出され（1974 年）、その後すべてのトカマクで観測されている。最近は、X 線トモグラフィーを応用した測定により詳細なデータが得られている。プラズマが定常状態であれば、ほぼ一定の周期で、中心付近の軟 X 線のゆっくりとした上昇と急激な減少、それに伴い、 $q = 1$ 面（磁力線がトーラス方向へ一回まわると、ポロイダル方向にも一回まわり、磁力線が閉じる面）の外側では、軟 X 線の急激な上昇とゆっくりした減少という位相が 180° 反転したような現象が発生する。この巨視的なふるまいは $q = 1$ 面で発生し易い $m = 1$ モードのキンクあるいはテアリング不安定性の非線形発展と磁力線のリコネクションを基礎とする Kadomtsev モデル（1975 年）によりほぼ説明できると考えられてきた。これによると大型トカマクでは軟 X 線の急減少の時間スケールがどんどん長くなると予想されるが実験はそうではなく、ほぼ $100 \mu\text{sec}$ 程度のままであった。このために、Kadomtsev モデルの修正が必要であり、成長率の特に大きい不安定性に原因を求める方向にある。MHD モデルの非線形計算により実験データをある程度再現できるが、時間スケールは合わない。このため、MHD モデルにおける熱伝導係数に異常輸送を導入する必要があるが、この原因としてやはり磁力線のカオスが考えられる。磁力線のカオスは、実験条件によっては $m = 1$ の磁気島面が十分に発達しないのに sawtooth oscillation が見られる場合の説明としても使われている。

sawtooth oscillation により、プラズマ内部から周辺領域へは、電子の熱流、イオンの熱流だけでなく、プラズマ密度、非熱粒子や不純物イオンも流出している。理論的にはトカマクの非線形 MHD 現象の代表例として調べられているが、トーラス配位では磁気島の発達により磁力線がエルゴディックになる領域が必ず現われる。こ

の領域の研究はまだ十分ではない。

§ 5. 磁力線のカオスとプラズマ閉込め

トーラスプラズマの磁力線を横切る方向の輸送は異常輸送と呼ばれ、新古典拡散に比べて約100倍程度大きくなっている。この原因は、§ 4でも述べたように、プラズマ乱流に原因を求める立場と磁力線のカオスによるとする立場がある。ここでは、磁力線のカオスの影響を調べたTEXTトカマク（テキサス大学）の実験に注目する。このトカマクでは、外部から共鳴摂動磁場を加えて、磁力線がエルゴディックになる領域を周辺に強制的に発生させて、その閉込めに対する影響を調べている。

主として準線形モデルに基づいて磁力線のカオスに基づく輸送係数を評価し、実験における輸送の増大と比較検討している。プラズマ表面付近では、特に電子の熱輸送係数は $10\text{m}^2/\text{s}$ から $100\text{m}^2/\text{s}$ 程度まで大きくなっている。これにより、プラズマ周辺の電子温度は減少するが、中心の電子温度に対する影響は大きくない。磁力線のカオスがプラズマ閉込めを変化させることは確認された。しかし、外部から磁気面を破壊しなくても $10\text{m}^2/\text{s}$ というような大きな熱輸送係数があり、これがやはり磁力線のintrinsti stochasticityによるかどうかはまだ結論が得られていない。TEXTトカマクの別の実験結果は密度と電場のゆらぎによる異常輸送が原因と考えた方がよいことを示しているが、大型トカマクでもそうであるかどうかはわかっていないのが現状である。

§ 6 プラズマによるカオスの修復について

非軸対称トーラスでは、プラズマが存在しない真空状態で、磁力線のカオスが既に存在している点がトカマクとは異なっている。ここで興味があるのは 磁力線はエルゴディックなふるまいをしているとして、プラズマによるカオスの修復作用 (healing effect) はあるかどうかである。

MHD理論に基づく理論計算では、磁力線が磁気井戸を形成していると安定化効果、あるいはhealing effectの可能性がある。

トーラスプラズマでは電流に対して $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ が成立ち、磁力

線のカオスを修復するような $J_{\parallel}$ がうまく生成できれば可能である。トーラスプラズマでは、反磁性電流 $J_{\perp}$ と $J_{\parallel}$ は密接に関連しているので、不均一磁場の形状や大きさによってはhealing effectは期待できるだろうと考えている。

§ 8. まとめ

プラズマ物理において、カオスはいろいろな局面で見出されているが、核融合を目指す磁場閉込めにおいてもその重要性は高く、カオスの周辺の一つとして、考慮していただければ幸いである。磁場中に閉じ込められたプラズマの挙動は複雑であるが理論的には研究の対象としては興味がつきないものと考えている。カオスだけでなくプラズマ物理にも関心を寄せていただきたいと思っている。