

小特集

ヘリカル系における H モード

H-Mode Physics in Stellarators

1. ヘリカル系 H モード研究の課題
(トラス閉じ込め研究の観点から)岡村 昇一, 鎌田 裕¹⁾核融合科学研究所, ¹⁾日本原子力研究開発機構

(原稿受付: 2006年 2月20日)

核融合の開発研究において, H モードの十分な理解は今や基本的な前提条件とあってよい. H モードは, 今では特別の研究対象としての閉じ込め改善モードというよりも, ITER の実験シナリオでは標準的トカマク運転モードの一つとして扱われている[1]. トカマク放電では, プラズマ周辺のペダスタル部のプラズマパラメータは, 核燃焼プラズマの性能を決定する上に極めて重要である. なぜならプラズマ中心部の性能は, 境界条件として与えられる周辺部のパラメータによって大きく左右されるからであり, またプラズマの外周部 (Scrape-off Layer: SOL) やダイバータ部へ流出する熱および粒子の発生源となっているからである. ITER のスケーリング予測計算においても, 核融合燃焼率がペダスタル部のイオン温度に強く依存することが示されている. このようにペダスタル部の理解が本質的に重要であると認識されているが, 研究としてすでに完成されたものというには問題がある. トカマク実験における H モード放電の性格やその運転シナリオについては, 研究者の間の共通の理解として多くの論文や計画書などにまとめられてはいるが, 一方では ELM (Edge Localized Mode: エルムと呼ぶ) 制御などのプラズマ制御法には未解決な問題が多く, またペダスタル部の発展を記述するモデルはかなり未完成であるとの指摘もある. 我々核融合研究者の間では, 例えば ITPA 活動の中のペダスタルグループでの議論に見られるように, 活発な議論が現在でも進行中であるという状況である[2].

ヘリカル系閉じ込め研究において, H モード放電の研究はトカマクでの発見からおよそ10年後にスタートした[3-5]. その後ヘリカル系における H モードの研究は, (トカマクと比べて世界的に見ると実験装置の数が少なめという

ハンディは持っているものの) トカマク研究と比肩できるレベルにまで順調に発展してきた. その間, H モード放電において重要な役割をする周辺部輸送障壁 (Edge Transport Barrier: ETB) の研究に加えて, 内部輸送障壁 (Internal Transport Barrier: ITB) の研究も進展している[6]. トカマクとヘリカル系では, 同じトラス系閉じ込めといっても磁場配位に本質的な違いがいくつか存在する. 例えば, トカマクが軸対称配位であるのに対してヘリカル系は三次元構造を持ち, また H モード放電で重要なプラズマ周辺部の磁気シアの大きさやその極性は両者で大きく異なっている. しかしながら H モード等の輸送障壁研究において, 両者の間には共通の物理現象も多く存在していることもわかってきた. 今回の小特集では, 主にヘリカル系における H モード研究 (周辺部輸送障壁) について論ずることとし, 内部輸送障壁については議論しないことにした. 議論はできるだけトラス閉じ込め研究の全体像としての視点を念頭におき, 様々なタイプのヘリカル系閉じ込め装置での研究の比較をした上で, トカマクでの研究成果との共通点と異なる点を明らかにしながら, 一般的な物理的理解を得ることを目標として進めるように努力する.

ITER の建設がすぐにもスタートしようとしている現在, 核融合研究は新しい時代に入ったといえる. ITER 装置の建設と運転シナリオの設計は, 第一義的にはこれまで長い年月の間に貯えられてきたトカマク実験の成果に基づいている. しかしながら, 実験計画の精度をより高度なものとするため, また運転シナリオのさらなる改良を目指すためには, 想定される様々な放電 (運転) に含まれる物理過程の理解のレベルを改善する必要がある. このように理解の増進が特に求められる研究領域として, H モードのペ

Physics Interests in H-Mode Discharges of Stellarators from the Aspect of General Toroidal Confinement

OKAMURA Shoichi and KAMADA Yutaka

author's e-mail: okamura@nifs.ac.jp

デスタルの物理をあげることができよう。それはペデスタルが、複雑な現象の総合体といった側面を持っているからである。ペデスタルの空間構造とその時間発展の物理は、輸送現象やMHD安定性などのプラズマ物理と原子分子過程との複合現象である。空間のスケール長としては、イオンのラーモア半径と中性粒子のプラズマへの侵入長とを同時に考慮しなければならない。さらにトカマク等の軸対称系にあっても、ペデスタル部の空間構造とその発展現象では、二次元的なものとは三次元的なものが入り交じっているという事情がある。動的発展の理解においては、時間スケールとしてMHD乱流の成長率から、磁場に平行方向あるいは垂直方向の輸送の時定数、プラズマのエッジ部での電流の時定数、さらには真空容器壁内の電流の飽和の時定数まで含めてモデル化することが必要である。このように複雑なシステムを十分に理解するためには、異なる磁場配位を持った実験装置における研究成果を総合化するような、広い視野を持った研究が特に有用であると考えられる。

これまでに得られたトカマク研究の視点から、理解をさらに進めるべきと考えられる研究項目を以下にまとめる。まず周辺部輸送障壁(ETB)の幅(広がり)がどのような物理過程から決定されているかについての理解が不十分である。複数のトカマク実験を比較するなどの研究によりかなり理解が進んでいることも確かであるが、トカマク実験からはETBの幅についてのスケールリング則はまだ確立されていない。ペデスタル部の密度分布については中性粒子の影響のモデリングは進んでいるが、系統的な実験的検証研究は行われていない。Greenwald密度限界値に近いような高密度運転については、低衝突数領域へのパラメータ拡張が必要である。ELM崩壊現象においてはMHD不安定性の非線形発展を理解しなければならない。これらの研究は、実際の核融合炉で実現されると考えられる、ELMが全く無いあるいは極く小さな状態の理解にもつながるものでないといけない。この観点からは、周辺磁場を実験的に乱す(ergodization)ことによって輸送とMHD安定性を制御するアイデアも重要である。これらの重要研究課題のためには、空間と時間に対して高い分解能を持った、プラズマ周辺部の電流分布の先進的計測機器の開発も必要である。

ヘリカル系プラズマ閉じ込め研究は、トカマク研究とは別の意味において新しい時代に入りつつある。一時代前の主役であったW7-ASやCHSなどの実験が終了し、三種類の新しい大型装置(LHD, W7-X, NCSX)の実験の時代に入ろうとしている。物理現象の理解という観点からは、実験データとして様々な実験環境からの観測結果の集積は、研究の視野を広げる面で利点が大きいと考えられる。ヘリカル系のプラズマ閉じ込め研究は、世界的に多くの異なる磁場配位の装置が研究に参加しているという点で、このような観点に対して好条件の環境を持っている。装置のサイズとしても、大型装置の筆頭であるLHD, W7-Xから、大学レベルの装置を使いながら質の良い研究をしている研究グループまで揃っている。ヘリカル系装置は、その磁場配

位の基本的特性からまず2つのグループに分類できる：プラズマ周辺部で強い磁気シアを持った装置(LHD, CHS)と、弱い(あるいは殆どゼロの)磁気シアを持った装置(Heliotron J, TU-Heliac, H-1, W7-AS)である。強い磁気シアを持った装置は、エッジでの磁気シアの値はトカマクと反対(いわゆるreversed shear)である。この小特集の目的は、これらの多様な装置(新しい装置から古い装置まで、大きな実験から小さな実験まで)からの実験成果をまとめた上で、さらにその結果をトカマクのペデスタル物理の議論と比較検討し、最終的にはプラズマ周辺部での閉じ込め改善の一般的な議論に発展させることである。各章において、まずそれぞれの実験装置からの成果について記述していただくが、その物理的研究のそれぞれの課題要素について、他のヘリカル系実験の成果またトカマクでの成果と比較した議論に発展させることを目指す。

この前書きの残りの部分において、ヘリカル系のHモード研究に共通の研究課題と考えられるいくつかのトピックについて触れる。これらは続く各章においてそれぞれの実験成果に対応して議論される。最初のトピックは、いつどのような条件においてHモードが現れるかという基本的な設問である。このトピックの一つの側面は、いわゆるHモード遷移のための閾値(加熱入力、プラズマ密度、プラズマ周辺部の温度、同じく衝突頻度、これらの値のスケールリング則)の議論であり、その条件に関するヘリカル系とトカマクとの比較である。この中のいくつかに関しては磁場配位に依存しない条件であって、ヘリカル系とトカマクに共通のものであるかもしれない。また一方、もしこれらの閾値の中で磁場配位に強く依存するものが見つければ、それはそれで非常に興味深い結果である。ヘリカル系装置の広い範囲の磁場配位による実験結果は、このトピックについての理解を深めるような貢献が期待できる。

トカマクとの比較において、ヘリカル系閉じ込め実験が示す有利な特性の一つとして、高密度領域での良好な閉じ込め性能があげられる。低磁気シア装置であるW7-ASの実験では、この特性の大きな進展として高密度Hモード放電(HDH)が見つかった[7]。もしこの放電モードが三次元磁場配位に限定された現象でなければ、この実験結果の解析を進めて理解を改善することにより、トカマクを含む一般的なトラス閉じ込めにおける高密度Hモードの可能性につなげることもできるはずである。

ヘリカル系における輸送過程の大きな特徴は、非軸対称の磁場配位における新古典論に基づいた非両極性の径方向粒子輸送過程である。この議論では径方向の電場の構造が重要となり、それは直接的にプラズマの流れの径方向分布に結びつくこととなって、最終的にはHモード遷移を引き起こす条件を決定する。トカマクのHモードの議論では、通常は磁場配位を軸対称として扱うためにここで触れたような非軸対称系での非両極性輸送に伴う電場の議論は考慮されていない。このような新古典論に基づいた電場の研究は、小型のヘリカル系装置では外部から電極を用いて電場を制御することが可能であり、またプローブを用いることで電位やプラズマパラメータの詳細な分布を測定でき

るメリットを活かした研究が行われている。

ヘリカル系の H モード実験では、プラズマ境界の回転変換として特別の値において H モード遷移が観測されるデータが多くの装置から報告されている。このような性質は、プラズマ境界での磁気シアの大きな装置と小さな装置とに共通のものとして報告されている。この現象の解釈においてしばしば議論されるトピックとしては、特定の回転変換の値に対応した磁気面に生成された磁気島が H モード遷移に対して果たす役割である。H モード遷移のための条件としてこのような磁気面量だけでなく、遷移の物理モデルで重要な役割を果たしているプラズマの流れ、あるいは電場の構造、密度や温度の勾配の分布、さらには揺動分布の構造などにも議論を進める必要がある。これらの物理量の分布について、さまざまな磁場配位を持つヘリカル系とトカマクを含めた総合的な議論ができれば、H モードの物理的理解が大きく進展することが期待される。

ヘリカル系の H モード研究においては（前にも指摘したことはあるが、世界的な装置の絶対数と実験グループの規模からくる制限のために）、トカマクでの研究と比較した場合に、ペDESTAL部の物理量の空間構造に対する情報がまだ不十分といわざるを得ない。トカマクでは数多くのデータが多くのトカマク実験から得られているが、それらのデータはかなりの部分は比較的共通の磁場配位による研究成果となっている。それに対してヘリカル系研究の有利点は、データが幅広い磁場配位の実験から得られているという点である。これらのデータをできるだけ集積した上で、物理の議論の俎上に載せるべく整理する必要がある。すでに述べたようにトカマクの H モードの議論では、ITER の運転パラメータの多くがペDESTALの幅に依存して決まるケースがあるために、この議論は緊急度の高いトピックとなっている。ペDESTALの構造に関して、一般的な理解に基づいたスケージングを確立するために、磁場構造の広い範囲に応じた研究成果を集積できるヘリカル実験が果たす役割は大きい。

ヘリカル系の比較的小型の装置では、プローブを用いたプラズマ周辺部での詳細な乱流の分布測定（特に静電的な揺動測定）に基づいた研究が進展している [8, 9]。測定結果に対して、揺動と輸送障壁との関連と帯状流 (zonal flow) の問題、Reynolds stress や電場の問題などが議論されている。これらの課題については、低温度プラズマに対しても良好な磁気面を形成することができるヘリカル系実験において、質の良い実験が進行しているといえるだろう。静電的な揺動の研究は、ペDESTAL部における粒子輸送の議論において重要な要素であり、ペDESTAL部の密度分布や圧力勾配を考える上で重要な研究課題でもある。

ヘリカル系磁場配位では、その三次元構造からくる特性として、プラズマ境界においてエルゴディック層の存在が重要な要素となる。磁気面の最外殻の外側の領域にもかなりの密度が保持されていることは、多くの実験の測定から明らかになっている。この事実はペDESTAL部の密度分布形成にも大きく影響する。エルゴディック領域の存在は、H モード遷移の条件としても影響を与える。DIII-D 実験に

おいて、三次元構造を持った摂動磁場を加えることによりトカマクの周辺磁場構造にエルゴディック領域を発生させ、ELM のエネルギーロスの程度を和らげることに成功している [10]。この実験結果をきっかけとして、H モードにおける周辺磁場構造のエルゴディシティの問題は最近大きな注目を浴びている。ヘリカル研究とトカマク研究の間で、この研究課題をさらに進めるべく共同研究を組織することで、ITER 計画に大きく貢献する可能性もある。

トカマクでの H モードの議論では、ELM は最も重要なキーワードといってよい。ヘリカル系の H モード実験のこれまでの成果の範囲においては、ELM が危険な領域に達した事実はない。ヘリカル系の大型装置において、危険なレベルの大きな ELM がまだ発生していないというのが主要な理由である。しかしながらヘリカル系の H モードにおいても ELM は観測されており、将来のヘリカル系核融合炉において、ELM が安全なレベルに留まるかどうかについての確証は得られていない。このような観点から、ヘリカル系実験における ELM の性質の研究はヘリカル炉の議論とも密接に関連している上に、トラス閉じ込めの改善モードに共通の議論として重要なトピックである。トカマク実験では、ELM の制御という課題においてペDESTAL部の MHD 安定性の問題は最も基本的な物理課題である。MHD 安定性の議論において、ヘリカル系装置とトカマクとの間の磁場配位の違いは本質的な問題であり、トカマクでの議論に対応したヘリカル系における ELM の発生を説明する MHD 安定性の解析を進めることが必要である。H モードにおける磁気プローブのデータは、多くの実験において定常的に得られているはずであり、ELM 現象に関連してこれらの測定データを組織的に集積し、ヘリカル系とトカマクを比較する視点から精密に解析することは重要な研究課題である。

プラズマの周辺領域における原子・分子過程は、それらが基本的には磁場構造の影響を受けないことから、どのトラス閉じ込め研究においても大差のない現象であると考えられている。しかしながら、磁気面の幾何学的形状なりそれに対応した真空容器の形は、ヘリカル系装置のそれぞれに対して大きく異なっている。またトカマクとの比較でいうと、ヘリカル系の装置としての三次元構造は重要な役割を果たしている可能性もある。このような原子・分子過程の議論は、重要課題であるペDESTALの幅の議論にも密接に関連してくる。ヘリカル系実験からの測定データの整理と解析は、ヘリカル系についてはトラス全般のペDESTAL構造の理解にとって不可欠な仕事である。

トカマク研究は、ITER 実験計画との関連が強く要請されるようになった近年の状況において、一般的な物理課題に対する広い観点からの総合的な研究提案がなされにくい環境に変化しているように思える。それに反してヘリカル系閉じ込め研究は、世界的な一つの共通目標がまだ選択されていない状況にある。この状況がヘリカル系研究の優れた特徴とまでは簡単にいうことはできないが、プラズマ閉じ込めの物理研究課題に取り組む上では、総合的、多面的な研究アプローチが取りやすいというメリットとして考

えることができる。例として、プラズマの境界に対する条件としては、我々は磁気島構造、ヘリカルダイバータ、リミタ境界などの選択肢を持っている。これらの多様な実験のデータを解析することによって、トカマク研究のある意味ではかなり画一的となった研究方針とは異なり、一般的な理解につながる情報を得る研究を進めることができる環境にある。

この後の各章の報告において、各実験装置はそれぞれ他の装置にない特徴を有している。ヘリカル系研究の現在におけるこのような特徴は、科学的見地からは優れた環境であるといえる。それぞれの装置の特徴に応じて、各章ではHモードのトラス一般としての物理課題の特定の部分について記述することになる。これらの実験結果についての報告の後には、ヘリカル系およびトカマクの間での比較、さらにはトラス閉じ込め共通の現象としての議論がなされる。最後の章において、現状での研究成果を受けて、どのような研究課題がまだ十分に調べられていないか、また今後ヘリカル系装置またはトカマク装置、さらにはそれら

の共同研究として、どのような研究計画が実現されれば、トラス閉じ込めの一般的な研究課題としてのHモード現象の理解が進展するかについて簡潔に記述する。

参考文献

- [1] The ITER Physics Basis, Nucl. Fusion **39**, 2137 (1999).
- [2] ITPA, 'Progress in the ITER Physics Basis', *submitted to Nucl. Fusion*
- [3] F. Wagner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **49**, 1408 (1982).
- [4] V. Erckmann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **70**, 2086 (1993).
- [5] K. Toi *et al.*, *Proc. 14th Int. Conf. on Plasma Physics and Control. Nucl. Fusion Res.* (Würzburg, 1992) Vol. 2, p461 (Vienna, IAEA, 1993).
- [6] F. Wagner *et al.*, *H-mode workshop invited talk in 2005*, PPCF (2006)
- [7] K. MacCormic *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 015001 (2002).
- [8] M. Shats, J. Plasma Fusion Res. **82**, 353 (2006) Chapter 6 in this review.
- [9] M. Ramisch *et al.*, New J. Phys. **5**, 12 (2003).
- [10] T. Evans *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 235003 (2004).