

## 2.4 核融合プラズマにおけるアルヴェン固有モードの非線形時間発展

藤堂泰

todo@nifs.ac.jp

核融合科学研究所

### 1. はじめに

核融合プラズマは、粒子と熱の供給・排出が存在する開いた系において、プラズマが輸送現象を通して自律的に構造を決定するところにその特徴がある。さらにその構造は必ずしも定常的なものではなく、非定常の振る舞いも多く観測されており、核融合プラズマにおける自己組織化過程の研究をより興味深いものとしている。筆者は核融合プラズマにおける自己組織化過程の一つの代表的な例として、アルヴェン固有モード（基本的にアルヴェン波の性質を持つ固有振動）と、それと共鳴的に相互作用する高速イオン分布の非線形時間発展を、計算機シミュレーションを手段として研究している。

アルヴェン固有モードの例を図1に示す。アルヴェン固有モードが注目を集めるようになった背景には、大型トカマクにおいて重水素-三重水素(D-T)プラズマ実験が行われるようになり、さらにはD-T核融合実験を目的とした国際熱核融合実験炉(ITER)計画が現実味を帯びてきたという事情がある。D-Tプラズマにおいては、その核融合反応から $\alpha$ 粒子が発生する。発生直後の $\alpha$ 粒子の速度はアルヴェン速度と同程度かそれ以上であるので、アルヴェン固有モードと共鳴し得るのである。アルヴェン固有モードは単独では安定であるが、 $\alpha$ 粒子と共鳴すると不安定になる可能性がある。

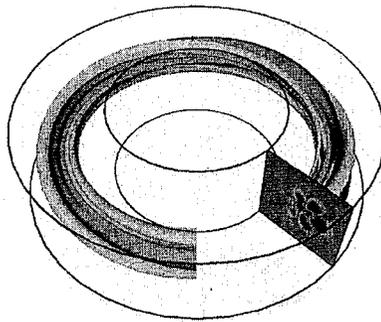


図1: アルヴェン固有モードの電場構造。

ITERにおいて $\alpha$ 粒子はプラズマ加熱の主役として期待されているのだが、アルヴェン固有モードが大振幅に成長すると $\alpha$ 粒子の損失をもたらし、 $\alpha$ 粒子による加熱効率が劣化してしまう。つまり、ITERのようなプラズマ加熱の主役を核融合反応が担う装置においては(ITERに限らず核融合炉とは本来そのようなものでなければならない)、アルヴェン固有モードと $\alpha$ 粒子の振る舞いは重要な研究課題なのである。

核融合への応用上重要であるのと同時に、この問題は自己組織化の問題としても興味深い性質を有している。筆者らが初期に行ったシミュレーション研究では、初期条件は仮定され、その結果は古典的な無衝突プラズマの枠組みの範囲で理解できるものであった。しかしこのシミュレーションは、実験において観測される定常的時間発展と非定常時間発展の双方を十分に説明することができなかった。そこで、高速イオン生成や粒子衝突といった分布形成過程を考慮したシミュレーションを最近では実行し、定常的振る舞いと非定常的振る舞いの双方を再現することに成功している。特に粒子衝突の効果が重要であり、衝突周波数のアルヴェン固有モード減衰率に対する大小が、定常・非定常の振る舞いの別を決定していることが明らかになっている。これらについて次節

以降順を追って紹介する。

## 2. 初期の計算機シミュレーションの成果

核融合プラズマは、プラズマの巨視的空間スケールとデバイ長などの微視的空間スケールとの比が非常に大きいことや電磁場の揺動レベルがプラズマ温度と比較して小さいことなどが原因となっており、通常のプラズマシミュレーションモデルを適用することが困難である。そこでアルヴェン固有モードのシミュレーションにおいては、 $\alpha$ 粒子などの高速イオンのみを運動論的に取り扱いプラズマの残りの部分は磁気流体として近似するモデルが用いられている。「運動論的」とは、プラズマ位相空間の情報を密度や圧力といった巨視的流量に集約せずに、位相空間における速度方向の分布をも考慮することを意味する。アルヴェン固有モードと高速イオンの時間発展のような共鳴相互作用が本質的な問題においては、高速イオンを運動論的に取り扱うことが必要なのである。

このようなアルヴェン固有モードの計算機シミュレーションは筆者らを含めて1990年代前半から行われるようになってきた。当時注目されていたのは、単一のアルヴェン固有モードが高速イオンによって不安定化された後、どのような機構によってその成長が飽和するのかという問題であった。アルヴェン固有モードによる高速イオン損失がアルヴェン固有モードの振幅に依存するので、飽和機構と飽和振幅が重要なのである。

筆者らは磁気流体非線形性に加えて高速イオンの運動論的非線形性をも正しく取り入れたVlasov-磁気流体シミュレーション[1]を実行し、アルヴェン固有モードによる粒子捕捉が不安定性飽和をもたらすことを明らかにした。言い換えると、アルヴェン固有モードの振幅が小さい線形段階においては共鳴していた粒子が、アルヴェン固有モードの振幅が大きくなるとその影響を受けて軌道が変化し、最終的に共鳴できなくなりモードの成長が止まる、ということである。この結果は、ランダウ減衰の飽和が波動による粒子捕捉によってもたらされるという、プラズマ物理の基本的な事実の延長線上にあるものである。

この結果はアルヴェン固有モードの非線形時間発展を理解する上でまず考慮しなければならない重要な性質を明らかにしたという点で意味がある。しかし、単一のモードに関するシミュレーションであり、複数のモードが現れるのが一般的であるさまざまな実験結果を説明するためには、さらなる発展が必要であった。次節において実験から要請されることを簡単にまとめる。

## 3. 実験から要請されること

これまでにトカマクにおけるアルヴェン固有モードの実験としてはNBI (Neutral Beam Injection) 加熱実験 [2]、ICRF (ion-cyclotron-range-of-frequency) 加熱実験 [3]、TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor: 米国・プリンストンプラズマ物理研究所) における D-T プラズマ実験 [4] が行われている。D-T プラズマ以外の実験はそれぞれの加熱方法によって生じる高速イオンを  $\alpha$  粒子に見立てた模擬実験である。代表的な実験結果を図 2, 3 に示すが、興味深い事実は、多くの場合において、NBI プラズマにおいてはほぼ一定の時間間隔において複数のアルヴェン固有モードが同時にバースト的に現れるのに対して、ICRF プラズマや D-T プラズマにおいては典型的なアルヴェン固有モード減衰時間と比較して十分長い時間アルヴェン固有モードがほぼ一定の振幅を保つ、ということである。

実験結果を考察する上で重要なアルヴェン固有モードの性質は、アルヴェン固有モードに対してはいくつかの減衰機構が働くので、高速イオンが存在しない場合には減衰してしまうということである。このことを念頭に置くと、「粒子捕捉による飽和」という初期のシミュレーション結果から得られた描像では実験結果の次の点が説明できない。

まずバースト的な場合について。もし分布形成過程の特徴的な時間スケールが、線形成長時間やアルヴェン固有モード減衰時間よりも十分に長いのであれば、初期のシミュレーション研究を

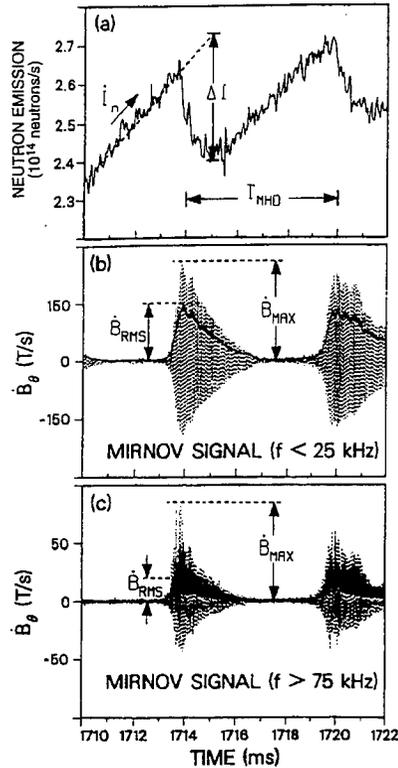


図 2: NBI加熱実験の例[2]。

(a) 中性子放出率の時間発展。中性子生成率の変化はプラズマ内の高速イオン分布の変化に対応しており、その減少は、高速イオン分布平坦化または高速イオン損失によってもたらされる。(b)、(c)はプラズマ周辺で測定された磁場揺動の時間発展。それぞれが低周波数(b)と高周波数成分(c)を示しており、(c)がアルヴェン固有モード相当する。アルヴェン固有モードの成長と中性子放出率の急激な減少の間に相関があることがわかる。

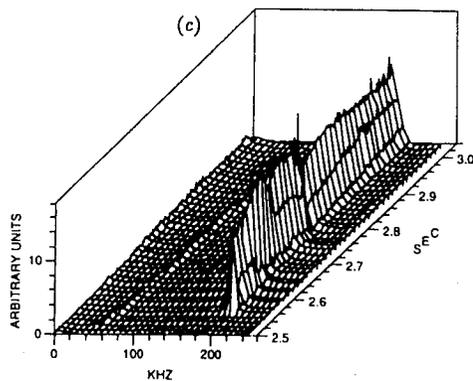


Figure 7. Continued.

図 3: ICRF加熱実験の例 [3]。磁場揺動を時間周波数成分に分解し、その振幅時間発展が鳥瞰図として示されている。ある固有周波数 (約200[kHz]) のアルヴェン固有モードが典型的なモード減衰時間 (1-10[msec]) よりも遙かに長い時間ほぼ一定の振幅を保っていることがわかる。

バースト的な場合にあってはめでもよく、粒子捕捉による飽和という描像が基本的にはあてはまる。しかし実験においてバーストが起こる場合には複数のモードが同時に成長しており、このことは単一モードのシミュレーション結果だけでは十分には説明できていない。これは各モード間の相互作用が無視できないことを示唆している。

次に定常的な振舞について考察する。粒子捕捉による飽和の後は高速イオンからアルヴェン固有モードへはエネルギーは与えられなくなる。一般にアルヴェン固有モードは何らかの減衰機構の影響を受けるから、飽和の後は減衰するはずなのである。しかし、ICRF実験やD-T実験においては定常的なアルヴェン固有モードが観測されているのである。つまり「粒子捕捉による飽和」はICRF実験やD-T実験における定常的アルヴェン固有モードを説明できない。

アルヴェン固有モードの振幅が有限の減衰機構が存在するにもかかわらず一定に維持されるということは、常に有限の駆動力が存在していることを意味し、新しい共鳴粒子が連続的に位相空間の共鳴領域に供給されていることを示唆している。このような効果は高速イオン生成（入射）・粒子衝突・ICRF加熱などの分布形成過程によってもたらされる。初期のシミュレーションにおいては高速イオン分布を初期条件として仮定し、計算中においては分布形成過程は無視されていた。この点が不十分であったと思われる。そこで筆者らは分布形成過程を考慮したシミュレーションを最近実行し、次節において紹介するような定常振幅状態や複数モードのバーストを再現した。

#### 4. 最近のシミュレーション研究の発展

ここで紹介するのは筆者らが最近実行した4次元のFokker-Planck方程式と磁気流体方程式を同時に解くシミュレーションで、高速イオンの速度空間は磁場に沿った成分のみが考慮されており、時間的に一定の高速イオン生成と粒子衝突による高速イオン減速が考慮されている[5]。図4(a)は減速時間がアルヴェン固有モード減衰時間と同程度の場合の結果を示している。4つのアルヴェン固有モードが不安定化されており、 $n=2-4$ モード ( $n$ はトロイダルモード数) はほぼ定常状態に落ち着いていることがわかる。図4(b)は減速時間がアルヴェン固有モード減衰時間の約10倍の場合で、 $n=1-4$ のアルヴェン固有モードがバースト的に繰り返し現れている。2回目、3回目のバーストにおいて全てのモードがほぼ同時に成長・減衰していることがわかる。この結果はNBI加熱実験において観測されるアルヴェン固有モードの振る舞いをよく再現していると言える。また図4(a)の結果もD-T実験やICRF実験の定常的アルヴェン固有モードと振る舞いがよく似ている。分布形成過程を考慮することによって、様々な実験結果を定性的には説明できるようになったと言える。

ここでは詳しくは述べないが、バーストが起こる場合は、高速イオンの分布が粒子源の分布と比較して大きく平坦化しさらにはプラズマ外部への損失も起こる。図2に示したような中性子放出率減少がうまく説明できるのである。

#### 5. まとめと今後の課題

アルヴェン固有モードは核融合炉実現を目指す上で重要な研究課題であると同時に、冒頭で述べたようにその時間発展は自己組織化の一例としての性質も有している。シミュレーション研究の初期の結果は古典的な無衝突プラズマの枠組みの範囲で理解できるものであったが、実験と比較しながら理論・シミュレーション研究が発展した結果、アルヴェン固有モードの時間発展を理解するためには、系を粒子生成や加熱を含む開いた系として認識した上で粒子衝突という緩和過程を考慮することが不可欠となってきた。筆者らは図4に示したように、アルヴェン固有モードの定常的な振る舞いとバースト的な振る舞いを計算機シミュレーションによって再現した。ただし、実験結果の定量的な説明にはまだ成功しておらず、それを目指して現在は5次元シミュレーションに取り組んでいるところである（核融合プラズマにおいては多くの場合、荷電粒子の磁場旋回運動に関して分布関数を平均化してよいので、5次元が最大次元である）。

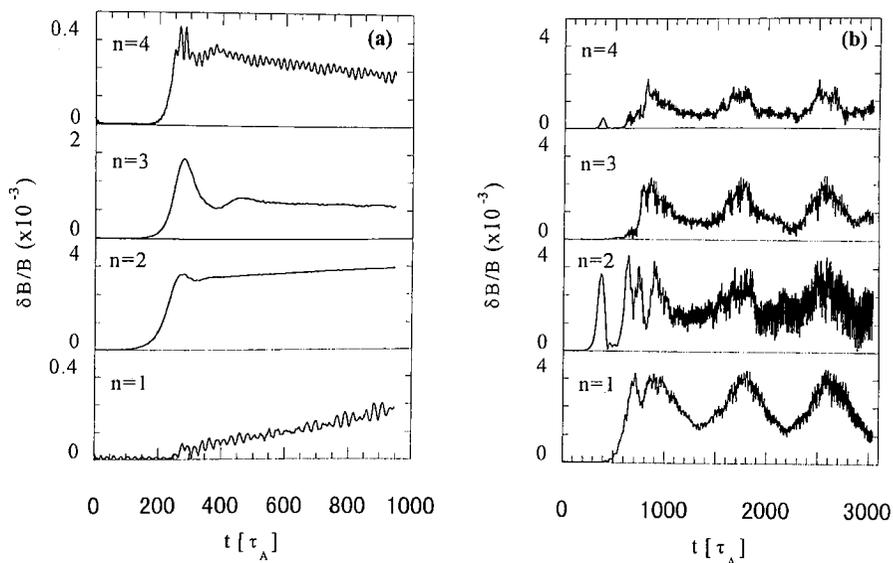


図 4: アルヴェン固有モード時間発展に関するFokker-Planck-磁気流体シミュレーション結果[5]。(a)高速イオン減速時間 ( $100\tau_A$ ) がモード減衰時間 (約 $100\tau_A$ ) と同程度の場合、(b)高速イオン減速時間 ( $1000\tau_A$ ) がモード減衰時間 (約 $100\tau_A$ ) よりも十分長い場合。それぞれトロイダルモード数 $n=1-4$ のアルヴェン固有モード振幅の時間発展を示しており、定常的な振る舞い(a)とバースト的な振る舞い(b)が再現されている。

#### 文献

- [1] Y. Todo et al., Phys. Plasmas 2, 2711 (1995).
- [2] H. H. Duong et al., Nucl. Fusion 33, 749 (1993).
- [3] K. L. Wong et al., Plasma Phys. Control. Fusion 36, 879 (1994).
- [4] R. Nazikian et al., Phys. Rev. Lett. 78, 2976 (1997).
- [5] Y. Todo and T. Sato, in Proceedings of the Joint Varenna-Lausanne International Workshop on Theory of Fusion Plasmas (Societa Italiana di Fisica, Bologna, 1999), p. 229.