

論文内容の要旨

論文題目 A Study of Magnetohydrodynamic Events Accompanying Magnetic Reconnection in Spherical Tokamak Plasmas

(球状トカマクプラズマにおける磁気リコネクションを伴う
MHD 事象に関する研究)

氏 名

東 條 寛

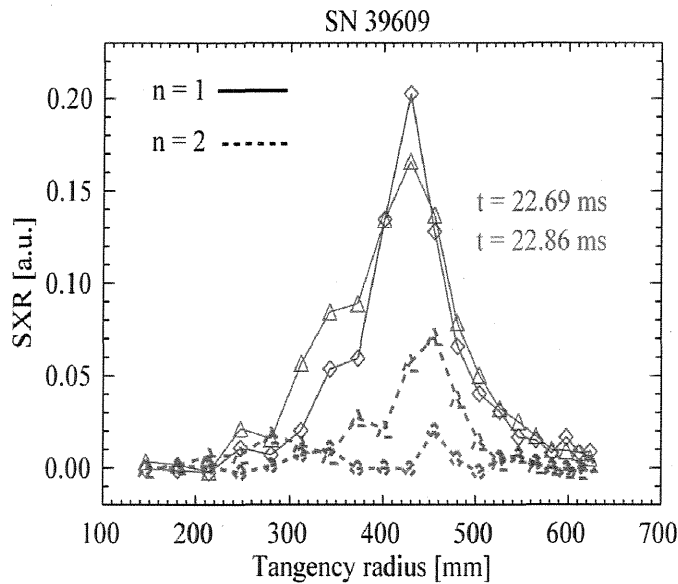
1. 背景

球状トカマクプラズマで起こる内部磁気リコネクション事象 (IRE) は、プラズマの崩壊やプラズマの内部エネルギーの損失を起し核融合炉を目指す球状トカマクにおいて回避すべき重大な不安定性である。3次元非線形抵抗性 MHD シミュレーション[1]により、プラズマの圧力勾配を駆動源とする複数の不安定モードが成長し、それらの非線形結合の結果、磁気リコネクションが起こりプラズマが崩壊することが示されている。球状トカマク START[2]や NSTX[3]における実験では、低波数のモードの成長は磁気揺動や軟 X 線放射強度分布で観測されていてプラズマの形状や電流分布等の比較等がされているが、それらの不安定モードがどのようにプラズマを崩壊させるかの発生機構の詳細を解明した例はない。また IRE は圧力駆動のモードを伴うかどうか未だ確認されていない。さらに、球状トカマクにおいてはプラズマの非円形断面および磁場分布の非対称性のため、ポロイダルモード数 (m) を同定するのは困難であり、その同定法の確立はモード解析に不可欠である。また IRE の、周辺部局在モード (ELM) [4]や鋸歯状振動[5]のような他の不安定性との明確な相違点が明らかにされておらず、これらを実験的な観点から区別することも重要な課題である。本研究では、これらの課題に対して、TST-2、MAST 装置において、磁気計測、軟 X 線計測を用いてデータを取得し、解析した。その結果、IRE 時には複数のモードが存在する場合と圧力勾配駆動モードが存在する場合があることが分かりそれらの回避策を得た。

2. TST-2 における不安定性 [6]

東大の TST-2 球状トカマクでは IRE 時のイオン加熱が見出され、IRE 研究が行われている。また、追加熱を用いないプラズマを対象に機動的な実験が可能である。TST-2 における不安定性と

それによる崩壊を調べるために、トロイダル接線方向に視野を持つ 20 チャンネルの軟 X 線検出器アレイ (接線 SXR カメラ) を新たに取り付け、空間分布とモード構造を計測した。磁気揺動



において同定された $n = 1$ (5 ~ 10 kHz) と $n = 2$ (10 ~ 17 kHz) に対応する周波数成分を SXR 分布から抽出した結果、2つのモードが $R_{tan} \sim 0.42$ m ($\rho \sim 0.3$) 付近に局在し、SXR の揺動強度が強め合うことが分かった。図 1 は SXR 揺動強度分布を示す。崩壊開始前の $t = 22.69$ ms では $n = 2$ の強度は弱く全体の強度は弱いですが、崩壊開始時刻周辺の $t = 22.86$ ms では両モードが強め合っている。

図 1 $t = 22.69$ ms (青) $t = 22.86$ ms (赤) における軟 X 線放射強度の $n = 1$ (実線) 及び $n = 2$ (点線) 揺動成分の分布。

3. モード数同定法としての三次元フィラメントモデルの確立 [7]

磁場分布の非対称性と非円形断面の効果が無視できない球状トカマク配位では、客観的なポロイダルモード数の同定が困難であり不安定性の詳細な解析を制限している。磁気面付近に局在するテアリングモードは 3 次元構造を伴うので、有理面 ($q = 1, 1.5, 2, 2.5, 3$) に局在する、磁力線に沿ったヘリカル状の三次元フィラメント電流を分布させ、モード構造を表すこととした。ここで q は磁力線のヘリカルピッチを表す安全係数である。電流は各モードについて変化させる。トロイダルモード数 n , ポロイダルモード数 m のモードを表す l 番目のフィラメントの電流を、

$$I_{mnl}(\theta, \phi) = I_0 \exp in(\phi(\theta) - \phi + \phi_l + \phi_0) \quad (1)$$

と表す。ここで、 ϕ はトロイダル角、 θ はポロイダル角であり、 I_0 はフィラメント電流の振幅、 $\phi(\theta)$ は磁力線の軌跡を表し、 ϕ_l は複数のフィラメントを分布させるためのトロイダル方向に等間隔な位相、 ϕ_0 は初期位置を表す位相である。図 2 は $m/n = 3/2$ を仮定したヘリカルフィラメントモデルと軸対称モデルの比較である。黒い点は MAST 装置に設置されている磁気プローブの位置である。フィラメント電流が作る磁場と計測した磁場とを比較し、最適な m, n, I_0, ϕ_0 を求める。以上を IRE の前兆振動 (ショット #18547) に適用し、2 種類のフィラメントモデルを用いて計測された磁気揺動との比較を行った。 $m/n = 2/1$ のモードを仮定した場合、 $m/n = 3/1, 3/2, 1/1$ を仮定した場合よりフィッティング残差が小さかった。フィラメント電流の振幅(b)は時定数 ~ 2 ms の成長を示すこと、初期位相は周期的に変化し、トロイダル回転をしていることがわかった。また、ヘリカルフィラメントモデルは軸対称モデルに比べ残差は約半分であり、有意に優れていることが示された。

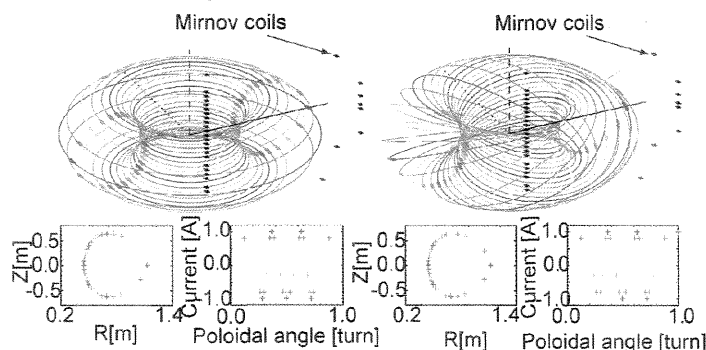


図 2 $m/n = 3/2$ モードを仮定した軸対称 (左) 及びヘリカル (右) フィラメントモデル。下の図はフィラメント電流分布のポロイダル断面分布 (左) およびポロイダル角分布 (右)。

4. MAST における不安定性 [8, 9]

イギリスの球状トカマク MAST は世界最大級の球状トカマク装置であり、高い圧力での不安定性の研究や、詳細な分布計測が可能である。放電中盤に IRE が起こった放電の典型例を図 3 に示す。プラズマ電流は一時的に増加し、電流分布の平坦化を示唆する。線積分電子密度と SXR はプラズマ外側から減少し始め、それが中心へ伝播していくのがわかる。これは、プラズマ中心から放射強度や電子温度の崩壊が起きる鋸歯状振動とは異なる。また平衡計算 EFIT により算出したトロイダル β (トロイダル磁気圧で規格化したプラズマ圧力) も減少している。磁気揺動には数 kHz の周波数成分が支配的なモードが見え、フィラメントモデル解析よりモード数は $m/n = 2/1$ のテアリングモードと同定される。また SXR の崩壊開始直前 ($t \sim 224.5$ ms) から 10 kHz 程度の周波数のモードが発生しているのを磁気揺動から確認した。このモードのモード数を同定するために $m/n = 2/1$ の成分を元の信号から差し引き、残りのデータに対し、 $m/n = 3/2, 4/2, 5/2$ それぞれのモードを仮定したフィッティングを行った。その結果、 $m/n = 5/2$ が磁気揺動の分布に対し残差の低いフィッティングを示した。その結果を図 4 に示す。規格化ポロイダル角 ~ 0.4 付近で磁気揺動は両モード共に強めあっており、2 つのモードによる局所的な分布の変形を示唆している。

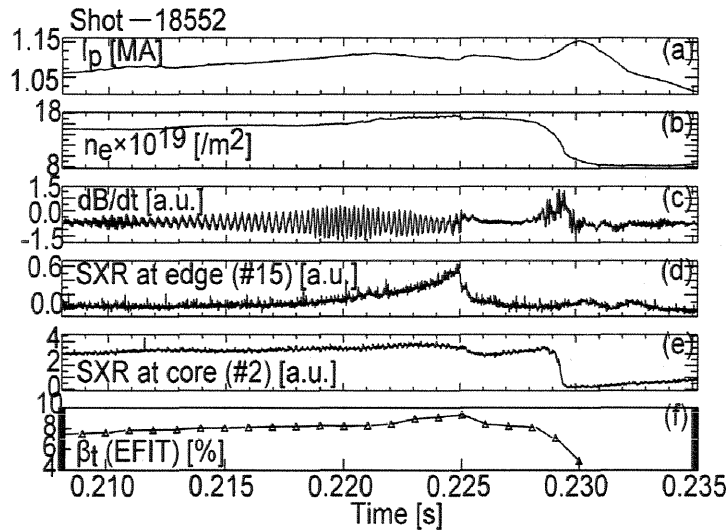


図 3 MAST における IRE を伴う放電波形(#18552)。(a) プラズマ電流 [MA]、(b) 線積分電子密度 [m^{-2}]、(c) 磁気プローブで計測した dB/dt [a.u.]、(d) プラズマ外側、(e) プラズマ内側で測定した軟 X 線放射強度 [a.u.]、(f) 平衡計算 EFIT により算出したトロイダルベータ値 (β_t) [%]。

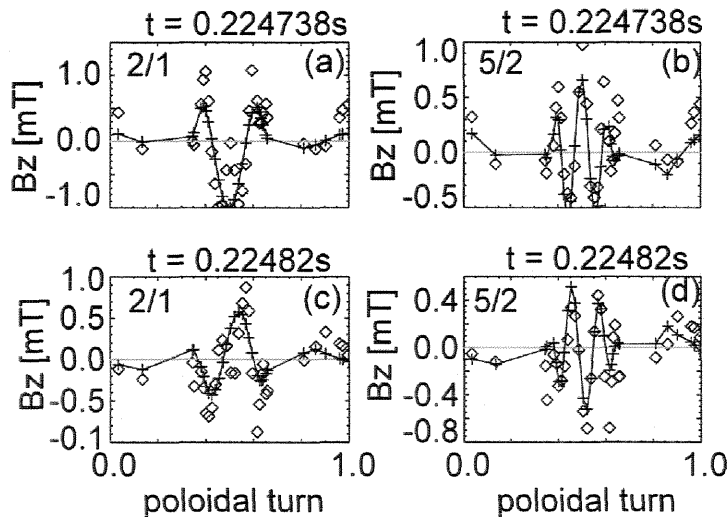


図 4 $m/n = 2/1$ 及び $m/n = 5/2$ を仮定したフィラメントモデルを用いたフィッティングの結果。(a)、(b) は $t = 0.224738$ s における磁場揺動分布 (mT) (\diamond) とフィッティングによる計算値 (実線)。(c)、(d) は $t = 0.22482$ s における結果。

次に放電の終盤でディスラプションに至る IRE で、モード回転が誤差磁場によって減衰し、壁による安定化がきかなくなり変形が成長する場合がある。これはロックドモードと呼ばれる。このタイプの放電では、 $n = 1$ モードの成長後、周波数が低下する。磁気揺動には 100 kHz の高周波成分が見え、その後 SXR は中心付近で減少する。この高周波数モードがバルーニングモード等の圧力勾配駆動不安定性である場合、強い圧力勾配や、高 n モードを伴うはずである。それらを

明らかにするために、トムソン散乱法で測定した電子温度分布の時間発展を調べた。圧力勾配因子(P_f)を $P_f = P_{max}/L_{FM}$ と定義すると (P_{max} は多項式関数でフィッティングした圧力分布の最大圧力、 L_{FM} は半値幅) 3.1×10^4 Pa/m から 4.0×10^4 Pa/m まで増加している。 n を求めるため、トロイダル方向に 10° 離れている2つの磁気コイルの波形のクロスコヒーレンスを算出した。100 kHz 程度に強いコヒーレンスがあり、位相差は最大で 70° と大きく、高 n (~ 7) モードの存在を示唆する。またトーラス内側と外側の磁気揺動は磁気軸からコイルまでの距離で規格化して比較すると外側の方が磁場の揺動振幅が強いことがわかった。これらの解析結果は、このモードがバルーニングモードであることを強く示唆する。

5. 球状トカマクの不安定性としての考察

鋸歯状振動は $m/n = 1/1$ のモードを伴う $q \sim 1$ 面付近の不安定性で、放電中に周期的に発生するが、著しいエネルギーの減少は伴わないことが多い。ELM は閉じ込め改善モード (H モード) において、プラズマ周辺部で発生する圧力勾配駆動モードである[4]。一方、MAST における IRE では低波数モード同士の結合や、強い $n = 1$ モードによって圧力勾配駆動のバルーニングモードが発生することがわかった。SXR 分布の変化によると、崩壊する場所は $q \sim 2$ 付近の場合が多く、ELM の場合より内側から崩壊が始まる。また $n = 1$ のような低波数モードの発生を伴う点は ELM と決定的に異なる。TST-2 で観測された IRE においてもプラズマ中心付近 ($\rho \sim 0.3$) におけるモード ($n = 1, 2$) が互いに強め合うことがわかり、MAST の IRE と同様のモード構造を持つ。MHD シミュレーション[1]の結果は、プラズマの電流分布や圧力勾配によって、低 n モードと高 n モードが成長する場合と、高 n モードのみが成長する場合があるという結果を得ている。実験において、IRE 時に複数の低波数モードが結合し局所的な変形を引き起こすということと、圧力勾配の急峻化により不安定モードが成長するという点ではシミュレーション結果と一致しているが、それらの成長の時定数は実験では 10~100 倍程度長く、一致していない。少なくとも高 n モードのみが成長する場合は IRE 回避のため、急峻な圧力勾配を緩和させる必要があることがわかった。

6. 結論

球状トカマクにおける不安定性 IRE の基本的性質を調べ、他の不安定性との区別を行い、また IRE 回避策がわかった。複数の低波数モードの成長とカップリングを伴い、モード構造や急峻な圧力勾配によるモード成長の振る舞いは、時定数を除きシミュレーション結果[1]と類似している。

7. 参考文献

- [1] T. Hayashi et al., Nuclear Fusion 40, 721 (2000).
- [2] A. Sykes et al., Physics of Plasmas 4, 1665 (1997)
- [3] I. Semenov et al., Physics of Plasmas 10, 664 (2003)
- [4] H. Zohm, Plasma Physics and Controlled Fusion 38, 105 (1996)
- [5] H. K. Park et al., Plasma and Fusion Research 2, S1002 (2007).
- [6] H. Tojo et al., Plasma and Fusion Research 2, S1065 (2007).
- [7] H. Tojo et al., Review of Scientific Instruments, in press (2008)
- [8] H. Tojo et al., Plasma and Fusion Research 3, S1065 (2008).
- [9] H. Tojo et al., to be published in the Proceedings of the 4th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori (2008)