

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360386

研究課題名(和文)高速粒子駆動巨視的不安定性によるトロイダルプラズマのMHDスペクトロスコピー

研究課題名(英文)MHD Spectroscopy using energetic particle driven global instabilities in toroidal plasmas

研究代表者

東井 和夫(Toi, Kazuo)

核融合科学研究所・その他部局等・名誉教授

研究者番号：20093057

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,900,000円

研究成果の概要(和文)：高速イオン駆動の電磁流体力学(MHD)不安定性、特にアルヴェン固有モードの固有周波数と径方向位置の情報に基づき閉じ込め磁場特性を決める回転変換あるいは安全係数の空間分布の時間発展を精度良く推定するMHDスペクトロスコピー法の可能性をトカマク及びヘリカルプラズマを用いて検証した。MHDスペクトロスコピー法に活用できる不安定性として知られている反転磁気シアアルヴェン固有モードに加え、非反転の通常磁気シアのプラズマでも励起される大域的アルヴェン固有モードも有用であることを本研究で初めて示した。このことは、本手法が幅広い条件のプラズマへ適用可能であることを示している。

研究成果の概要(英文)：Potentiality of Magneto-hydro-dynamic (MHD) spectroscopy using the information of the eigenfrequency and radial location of energetic ion driven MHD instabilities, in particular, Alfvén eigenmodes for prediction of the rotational transform (or safety factor) profile has been verified in both tokamak and helical plasmas. In this research, global Alfvén eigenmodes (GAEs) are found to be an another useful candidate for MHD spectroscopy as well as reversed magnetic shear Alfvén eigenmodes (RSAEs) that are already known to be useful for MHD spectroscopy in tokamak and helical plasmas. The MHD spectroscopy can be applied to toroidal plasmas with wide variety of the rotational transform profiles, since GAEs and RSAEs can be destabilized in such profiles.

研究分野：核融合学

キーワード：炉心プラズマ アルファ粒子 高速イオン アルヴェン固有モード 回転変換分布 トカマク及びヘリカル MHD不安定性

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トーラス型磁場閉じ込め核融合プラズマの磁力線の回転変換(i)分布(あるいは安全係数(q)分布)や磁気シア分布は、プラズマの閉じ込め特性を規定する重要な物理量である。核融合反応プラズマでは高速アルファ粒子の良好な閉じ込めが必須であるが、このような高速粒子は種々のアルヴェン固有モード(AE)を不安定化し、さらにはそれらの不安定性が高速アルファ粒子等の径方向輸送の増大や損失をもたらすことが危惧されている。このため多くのトカマクやヘリカル装置でこれらのAEの同定と高速イオン閉じ込めへの影響が広く研究されている。AEスペクトル計算コードの計算結果と実験データとの詳細な比較を通じてこれらのモードを精度良く同定できるようになってきた¹。すなわち、アルヴェン固有モードの固有周波数と径方向位置は、 i 分布あるいは q 分布に依存して決まる。特に、 q 分布がプラズマ中心以外で極値を有する反転磁気シア・トカマクプラズマで励起される反転磁気シアアルヴェン固有モード(Reversed shear Alfvén eigenmode: RSAE)の固有周波数は、 q 分布に極めて敏感に依存することが明らかとなり、RSAEの固有周波数の時間変化から q 分布の時間発展を精度良く推定できることが示され、MHDスペクトロスコピーの可能性が注目されるようになった²。

2. 研究の目的

トーラス型磁場閉じ込め核融合炉では高い中性子束や放射線環境下であり高度で繊細なプラズマ計測機器の設置は限られる。耐放射線の高い磁気プローブやミリ波計測器のデータから高速粒子駆動MHD不安定性の周波数や空間構造を測定し、モデルMHD平衡をもとに計算したアルヴェン固有モード周波数帯付近の固有モード周波数が、観測値と矛盾無く一致するように i 分布あるいは q 分布を調整し繰返し計算することにより同分布を決定する。このようにMHD不安定性の揺動特性からトーラスプラズマのMHD平衡・安定性を規定する i 分布(あるいは q 分布)のような内部磁場構造、電子及びイオン温度さらにはトロ

イダル回転速度分布情報などを導出する手法を「MHDスペクトロスコピー」と呼び、トカマクやヘリカルプラズマを含めたトーラスプラズマ全般に適用可能な簡便で精度の高いプラズマ内部推定法となる可能性があり、特に核融合炉で有効に活用されるものと期待される。本研究は、トカマクやヘリカルプラズマプラズマを含めたトロイダルプラズマへのMHDスペクトロスコピー法の適用可能性を検証することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置LHDで生成したヘリカルプラズマ及び韓国国立核融合研究所のKSTAR装置で生成したトカマクプラズマを用いてMHDスペクトロスコピーの可能性を、単調な i (あるいは q)分布を有すると思われる中性粒子入射(NBI)加熱プラズマ及び非単調な分布、すなわち、反転磁気シアが期待されるプラズマについて調べた。すなわち、

(1)単調な i (あるいは q)分布が予想される場合：LHDでは低ベータ値(=プラズマ圧力/磁気圧)で無電流のヘリカルプラズマにおいては真空磁場の i 分布に近く、回転変換は中心から周辺向かって短調増加する。このようなプラズマでは、トロイダル効果によるシア・アルヴェンスペクトルのギャップにトロイダルアルヴェン固有モード(Toroidicity induced Alfvén eigenmode: TAE)が存在し、実際のLHDプラズマでも低トロイダルモード数(n)のTAEがしばしば観測されている。また、KSTARトカマクの一定プラズマ電流フェイズでは単調な q 分布が予想され、プラズマ中心の q の低下により鋸歯状(sawtooth)振動が観測される。

(2)非単調な i (あるいは q)分布により反転磁気シア配位が期待される場合：LHDでは外部コイルで生成されている回転変換を減少させる向きのNBI駆動電流により反転磁気シアプラズマが生成され、高速イオンによりRSAEや帯状流の1種である高速イオン駆動測地線音響モード(Geodesic acoustic mode: GAM)が励起される³。また、LHDでは低磁場条件下でアイスレット入射と高電力NBI加熱を行うことにより、プラズマベータ値が高く、中心部に尖頭化した圧力分布を有するプラズマが

しばしば形成される。これにより磁気軸位置の大きな変位が生じ、反転磁気シアプラズマが得られる。一方、KSTARトカマクでは、他の大型トカマクで通常使われるプラズマ電流上昇フェイズでのNBI加熱による反転磁気シアプラズマ生成を試みた。

4. 研究成果

(1) 単調な l (あるいは q)分布が予想される場合: LHDの低ベータ無電流プラズマでは高速イオン駆動のTAEがしばしば観測されるが、低トロイダルモード数の $|n|=1$ や $|n|=2$ TAEである。TAEのモード中心の回転変換は $t_{TAE}=2n/(2m+1)$ となり、TAEの空間構造の計測データが得られ且ついくつかの n のTAEが同時に励起されれば、 l 分布が予測可能である。ここで、 m はポロイダルモード数である。ただ、LHDでの一連の実験では期待したデータが得られず、TAE情報のみからは l 分布を精度良く推定できなかった。一方、同様に単調な q 分布が予想されるKSTARのsawtooth振動を伴うプラズマにおいて、TAE周波数帯の興味深い磁場揺動が観測された。これを図1に示す。プラズマ電流 I_p と線平均電子密度 $\langle n_e \rangle$ がプラズマ生成初期から時間とともにほぼ直線的に増加し、 $t=2.0$ sで一定値に達している。 $t=2.0$ sまでのフェイズで磁場揺動周波数が $\langle n_e \rangle$ とともに増加しておりTAEの固有周波数のような $1/\langle n_e \rangle^{1/2}$ のような依存性が見られず、むしろ q 分布の変化を示唆している。注目すべき点は、 $t=1.5$ sからのNBI加熱直前から明確なsawtooth振動が発生しており、 q 値はプラズマ中心に向かって単調に減少し $q=1$ にまで低下していると考えられる。このような条件から、観測された $n=2$ 磁場揺動はプラズマ中心部に励起さ

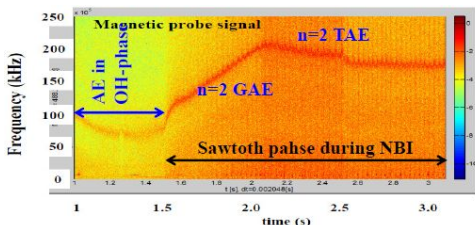


図1 KSTARのNBI加熱プラズマで観測されたAE周波数帯磁場揺動。 $t=2.0$ sまで I_p と $\langle n_e \rangle$ が直線的に上昇し、それぞれ600kA、 $1.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の一定値に達している。

れた大域的アルヴェン固有モード(Global Alfvén eigenmode: GAE)と考えられる。 $t=2.0$ s以降の準定常状態ではその周波数がTAE周波数に漸近している。このプラズマのMHD平衡データを用い、プラズマ中心の $q(0)$ を適切に仮定してアルヴェン固有モードの固有値解析コードAE3D4により計算した固有周波数は図1の実験データと良い一致を示すとともに、固有関数はプラズマ中心部に存在することが示された。また、注目すべき点は、sawtooth振動を伴うトカマクプラズマで初めて高速イオン励起GAEが観測されたことである。このGAEの時間変化から、 $q(0)$ 値がNBI加熱前の $t=1.4$ sで ~ 1 であり、しかも $t=2.0$ sでsawtooth振動が発生しているにもかかわらず $q(0)=0.9-0.85$ にまで低下していることが示された。図2には単調な q 分布において $q(0)$ を可変してKSTARプラズマに対してAE3Dコードで計算したGAE周波数とTAE周波数を示している。KSTARトカマクではsawtooth放電中でも $q(0)<1$ が実現されていると予想され、磁力線の完全再結合モデル⁵ではKSTARのsawtooth崩壊を正しく説

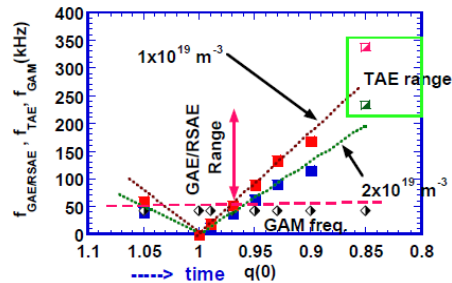


図2 KSTARプラズマにおいて単調な q 分布の $q(0)$ を可変しAE3Dコードにより計算したGAEとTAE周波数を示す。

明できず、崩壊モデルの改定が必要である。さらに、sawtooth崩壊中のGAE周波数変化は、sawtooth崩壊からむ磁力線再結合物理について今後、新たな情報を提供するものと思われる。これはMHDスペクトロスコーピーのもう一つの成果であり、今後GAEの空間構造や動的シタルク分光法による q 分布の直接計測との比較から、大きな展開が期待される。

(2)反転磁気シア配位が予想される場合：

KSTARトカマクでプラズマ電流ランブアップフェイズを利用した反転磁気シアプラズマ生成を目指し、プラズマ電流上昇率を0.3MA/sと同装置の最大値に設定し、プラズマ生成初期の低プラズマ電流段階で最大NBI電力でのプラズマ加熱・電流駆動を行ったが配分されたプラズマショット数の範囲内では反転磁気シアプラズマを生成できず、また高速イオン駆動RSAEも観測されなかった。他の大型トカマクではこの手法で反転磁気シアプラズマ生成とRSAE観測が多く行われ、RSAEによるMHDスペクトロスコピーの検証はかなり行われているといえる。一方、ヘリカルプラズマについては不十分である。そこでLHDで2種の手法で反転磁気シアプラズマ生成を試み、RSAEやその他の高速イオン駆動モードの観測とそれらの情報からプラズマのMHD平衡量である回転変換(l)分布情報の導出を試みた。まず、すでに確立したNBIによる逆方向(外部コイルによる回転変換を減少させる方向)電流駆動による手法により、反転磁気シアプラズマを生成した。このプラズマでは、RSAE及び高速イオン駆動GAMが同時に励起される³。RSAEの固有周波数が、NBI駆動プラズマ電流が増大するとともに下方掃引から極小値を通過して上方掃引に移行する。 l 分布の非中心極小値が $l_{min}=2/3, 1/2$ 及び $1/3$ を通過することが明らかとなり、反転磁気シア配位の時間変化が高い精度で明らかとなった。続いて、アイスレット入射による高ベータプラズマ条件での反転磁気シア配位プラズマ生

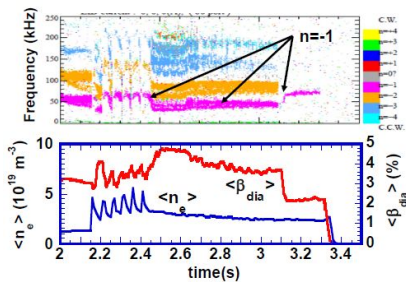


図3 アイスレット入射で実現した高ベータプラズマでの反転磁気シアプラズマにおける磁場揺動周波数とトロイダルモード数の時間変化と反磁性計測で得られたプラズマベータ値と線平均電子密度。

成を狙った。図3は、アイスレット入射によりプラズマの大きな磁気軸シフトを引き起こし、反転磁気シアプラズマが実現されたと思われるショットの磁場揺動強度と周波数の時間変化を示している。同図からわかるように最後のアイスレット入射後の $t=2.4$ sから $\langle n_e \rangle$ が緩やかに減少するとともにベータ値 $\langle \beta_{dia} \rangle$ が上昇している。このフェイズで $n=-1$ 磁場揺動周波数は減少している。一方、 $t=3.1$ sでNBI加熱電力の減少に伴い $\langle n_e \rangle$ はほぼ一定であるが $\langle \beta_{dia} \rangle$ が急速に低下すると同揺動周波数は急速に増大している。この周波数と $\langle n_e \rangle$ との相関が見られず、回転変換 l 分布の変化を反映していると考えられる。このプラズマのMHD平衡データを用いてAE3Dコードでシアルヴェンスペクトルと固有モードを計算した。 $\langle \beta_{dia} \rangle$ が最大の $t=2.533$ sに対する計算結果を図4に示す。図4に示した固有モード(2)の周波数が実験で観測された揺動周波数にほぼ一致しており、スペクトルの極小値のすぐ下にあり、このモードはGAEと考えられる。このGAEの固有関数は $m=-2/n=-1$ が基本フー

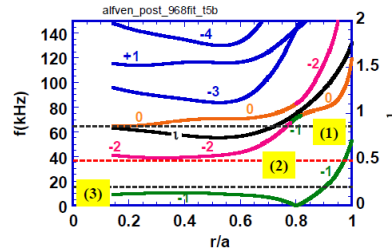


図4 図3のプラズマの $t=2.533$ sでのシアルヴェンスペクトルと仮定した回転変換分布。

リエモードであるが、大きな磁気軸シフトで磁気面が洋梨形に変形していることによりかなり大きな $m=-1$ 成分も有するという通常のGAEに比べ複雑な特徴を有している。図3のプラズマの $t=2.4$ sから $t=3.1$ sまでの高ベータフェイズの $n=-1$ GAE周波数の時間変化を矛盾なく再現する l 分布は反転磁気シア分布となっている。 $t=2.533$ sの最大ベータ値で最も妥当と考えられる l 分布は図5の実線で示す。比較のためわずかに存在する正味のプラズマ電流を無視した場合($I_p=0$ と仮定)の分布を破線で示すが、この分布では観測した $n=-1$ 磁場揺動周

波数を再現できない。このことは $n=-1$ GAEの周波数のみから、プラズマ中心以外に1箇所だけ極小値を有する反転磁気シア分布という条件での l 分布をほぼユニークに推定できる。モードの径方向位置のデータが揃えば、1箇所だけ極小値を有する反転磁気シア分布という仮定を導入せずにかなり一般的な非一様 l 分

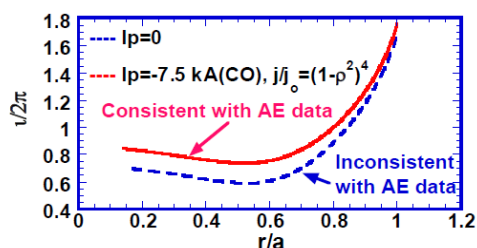


図5 図3の $n=-1$ GAEの磁場揺動周波数から推定した回転変換分布(実線)。破線はわずかなプラズマ電流を無視した時の回転変換分布(破線)では観測された $n=-1$ 揺動周波数を再現できない。

布を精度良く推定できると期待される。

プラズマ中心部で広い弱磁気シア領域を持つプラズマ、あるいは反転磁気シアプラズマにおける回転変換(あるいは安全係数)分布が、ある種の高速度イオン駆動アルヴェン固有モードの情報を利用したMHDスペクトロスコープより精度良く推定できることが本研究より明らかとなった。また、これらの不安定モードの観測周波数はプラズマのトロイダル回転によるドブラー効果によるシフトを受けるが、トロイダルモード数の異なるこれらのモードの周波数差からトロイダル回転速度の情報も得られる。このように、高速イオン駆動MHD不安定性の固有周波数と径方向の存在位置という比較的簡便な観測データを利用したMHDスペクトロスコープは、新しいタイプのプラズマ診断法としての可能性を示しており、特に、プラズマ計測機器の使用が限られる核融合炉で有効である。もちろんこれらの高速イオン駆動MHD不安定性は、高速イオン輸送に大きな影響を与えないようなレベルに低く抑えられていることが必要である。

<引用文献>

K. Toi, K. Ogawa, M. Isobe et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 53巻, 2011,

024008 1- 024008 33.

- 2 S.E. Sharapov, D. Testa, B. Alper et al., Phys. Lett. A, 289巻、2001, 127-134.
- 3 K. Toi et al., Phys. Rev. Lett. 105巻、2010, 145003 1 - 145003 4.
- 4 D.A. Spong, E. D’Azevedo and Y. Todo, Phys. Plasmas 17巻、2010, 022106 1 - 022106 12.
- 5 B.B. Kadomtsev, Soviet J. Plasma Phys. 1巻、1976, 389-394.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- 1 X.D. Du, K. Toi, M. Osakabe, S. Ohdachi et al., Resistive Interchange Modes Destabilized by helically trapped energetic ions in a helical plasma, Physical Review Letters, 査読有, 114巻, 2015, 155003 1 – 155003 5. DOI:10.1103/PhysRevLett.114.155003
- 2 N.N. Gorelenkov, S.D. Pinches, K. Toi, Energetic particle physics in fusion research in preparation for burning plasma experiments, Nuclear Fusion, 査読有, 54巻, 2014, 125001 1 - 125001 79. DOI: 10.1088/0029-5515/54/12/125001
- 3 K. Toi, S. Ohdachi, Y. Suzuki et al., Mitigation of large amplitude edge-localized modes by resonant magnetic perturbations on LHD, Nuclear Fusion, 査読有, 54巻, 2014, 033001 1 - 033001 14. DOI: 10.1088/0029-5515/54/3/033001.
- 4 K. Toi, Energetic-Ion-Driven Global Instabilities Observed in the Large Helical Device and Their Effects on Energetic Ion Confinement(Review paper), Plasma and Fusion Research, 査読有, 8巻, 2013, 1102002 1 - 1102002 13, DOI: 10.1585/pfr.8.1102002

[学会発表] (計6件)

- 1 K. Toi, Spectroscopy Using Energetic-Ion Driven Alfvén Eigenmodes in Toroidal Plasmas(口頭発表), Plasma Conference 2014, 2014年11月18日～11月21日, 新潟朱鷺メッセ, 新潟.
- 2 K. Toi, Quasi-Stationary Excitation of

- Geodesic Acoustic Modes by Energetic Ions in Reversed Shear Plasmas on LHD(口頭発表), 13th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 2013年9月17日~20日, Beijing, Beijing University, China.
- 3 K. Toi, Determination of the Safety Factor Profile by MHD Spectroscopy Using Energetic Particle Driven Modes in Toroidal Plasmas (Invited talk), A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas(招待講演), 2013年5月20日~5月23日, Beijing Redwall Sovereign Hotel, Beijing, China.
- 4 東井和夫, 磁場閉じ込め核融合反応プラズマのMHDスペクトロスコピー(口頭発表), 日本物理学会:地球電磁気・地球惑星圏学会、日本天文学会、プラズマ宇宙物理合同セッション、26aEA-11, 2013年3月26日-29日、広島大学, 広島.
- 5 K. Toi, MHD Spectroscopy using Energetic Ion Driven Global Modes Observed in KSTAR and LHD (招待講演), KSTAR Conference 2013, 2013年2月26日~2月27日, Lotte Buyeo Resort, 韓国.
- 6 K. Toi, “Development of MHD Spectroscopy Using Energetic-Particle-Driven Global Modes in 2D and 3D Toroidal Plasmas”, A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas(招待講演), 2013年1月22日~1月25日, Akan lake, Hokkaido, Japan.

6. 研究組織

(1)研究代表者

東井 和夫 (TOI, Kazuo)
 自然科学研究機構・核融合科学研究所・
 名誉教授
 研究者番号: 20093057

(2) 研究分担者
 なし

(3)連携研究者

- 磯部 光孝 (ISOBE, Mitsutaka)
 自然科学研究機構・核融合科学研究所・
 ヘリカル研究部・教授
 研究者番号: 00300731
- 徳沢 季彦 (TOKUZAWA, Tokihiko)
 自然科学研究機構・核融合科学研究所・
 ヘリカル研究部・准教授
 研究者番号: 90311208
- 長壁 正樹 (OSAKABE, Masaki)
 自然科学研究機構・核融合科学研究所・
 ヘリカル研究部・教授
 研究者番号: 90280601
- 大舘 暁 (OHDACHI, Satoshi)
 自然科学研究機構・核融合科学研究所・
 ヘリカル研究部・准教授
 研究者番号: 00270489
- 井戸 毅 (IDO, Takeshi)
 自然科学研究機構・核融合科学研究所・
 ヘリカル研究部・准教授
 研究者番号: 50332185
- 清水 昭博 (SHIMIZU, Akihiro)
 自然科学研究機構・核融合科学研究所・
 ヘリカル研究部・助教
 研究者番号: 00390633
- 山本 聡 (YAMAMOTO, Satoshi)
 京都大学・エネルギー科学研究所・助教
 研究者番号: 70397529

(4)研究協力者

- 小川 国大 (OGAWA Kunihiro)
 自然科学研究機構・核融合科学研究所・
 ヘリカル研究部・助教
- J. Kim
 韓国国立核融合研究所・KSTAR研究セン
 ター・研究員、韓国.
- J.H. Kim
 韓国国立核融合研究所・KSTAR研究セン
 ター・研究員、韓国.
- J.G. Bak
 韓国国立核融合研究所・KSTAR研究セン
 ター・研究員、韓国.
- D.A. Spong
 オークリッジ国立研究所・主任研究員、
 米国.