

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360457

研究課題名（和文）反転磁気シア配位プラズマ中の高速イオン励起 MHD 不安定性の
高速イオン輸送への影響研究課題名（英文）Effects of energetic-ion-driven MHD instabilities in a reversed
magnetic shear plasma on energetic ion transport

研究代表者 東井 和夫 (TOI KAZUO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：20093057

研究成果の概要（和文）：

大型ヘリカル装置(LHD)において中心部で正、周辺部で負の磁気シアを有するトカマクと異なる磁気シア構造の反転磁気シア(RS)配位プラズマ生成し、高速イオンにより反転磁気シアアルヴェン固有モード(RSAE)と高周波帯状流(GAM)とが同時に励起されることを観測した。RSAEとGAMの特性、非線形相互作用及び高速イオンや背景プラズマへの影響についてトカマクRS配位プラズマとの比較を行なった。これはこれら不安定性の体系的・包括的理解に重要である。

研究成果の概要（英文）：

A reversed magnetic shear (RS)-plasma where the shear is positive in plasma central region and negative in the edge region, different from the tokamak RS-plasma was produced in the Large Helical Device (LHD). In such plasma, reversed magnetic shear Alfvén eigenmode (RSAE) and geodesic acoustic mode (GAM) were concurrently excited by energetic ions. Characteristics of observed RSAE and GAM, nonlinear coupling of these instabilities, and their impacts on confinement of energetic ions and background bulk plasma were compared with those in tokamaks. The comparison study is important for systematic and comprehensive understanding of these instabilities.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|------------|
| 2009年度 | 5,200,000 | 1,560,000 | 6,760,000 |
| 2010年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 7,700,000 | 2,310,000 | 10,010,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：アルファ粒子、アルヴェン固有モード、反転磁気シア、高周波帯状流、高速イオン輸送

1. 研究開始当初の背景

中心から周辺部に向かって磁気シア符号が反転する反転磁気シア(RS)配位のトカ

マクプラズマは良好な閉じ込め性能を示すとともに、反転磁気シアアルヴェン固有モード(RSAE)と高周波帯状流(GAM)という特徴的な高速イオン駆動不安定性が励起さ

れる。ステラレータ/ヘリカルプラズマにおいてRS配位が生成されたときトカマクと同様の特性を示すかは興味深くまた重要である。大型ヘリカル装置LHDにおいて、中性粒子入射(NBI)電流駆動を利用してプラズマ中心以外にゼロ磁気シア面を有する反転磁気シア(RS)配位が生成され、高速イオン励起のRSAEとGAMが同時に観測された。

本基盤研究は、RSAE、GAM及びこれらの非線形結合で励起される巨視的不安定性の高速イオン輸送及び背景プラズマに与える影響を明らかにすることを目的としている。トカマクプラズマの反転磁気シア配位では、中心部で負磁気シア、周辺部で正磁気シアであるのに対し、LHDで実現されたRS配位では磁気シアがトカマクのRS配位と逆符号を持つという特徴を有する。このように異なるRS配位ではRSAEとGAMの発生条件がトカマクとヘリカルプラズマで異なる可能性があり、両者の特性比較からこれらの励起条件、高速イオン輸送への影響、さらには背景プラズマ輸送への影響についてトロイダルプラズマ共通の体系的理解が期待され、意義が大きい。

2. 研究の目的

(1)高速イオン駆動の巨視的不安定性であるRSAEとGAMの発生パラメータ領域の探索、(2)RSAEとGAMの空間構造と相互作用特性、(3)RSAEとGAMの高速イオンの再分布や損失へ及ぼす影響及び(4) RSAEやGAMの背景プラズマ閉じ込めへの影響、についてトカマクのRSプラズマとの比較研究を行い、トカマクとLHDでのこれらの体系的理解を目指す。これは将来の核燃焼プラズマ研究にとって重要である。

3. 研究の方法

LHDにおいて、回転変換を低減させる方向に中性粒子入射(NBI)によって電流駆動し、反転磁気シア(RS)プラズマを生成し、次の手順で研究を進めた。

(1)ミリ波反射計と重イオンビーム(HIBP)によりRSAEとGAMの電子密度揺動と電位揺動分布とその時間変化を計測した。また、電子サイクロトロン放射(ECE)による電子温度揺動の測定を試みた。RSAEとGAMの周波数の時間変化に注意を払う。

(2)RSAEやGAMにより誘起される磁場揺動信号を用いてRSAEとGAMの相互作用を調べた。

(3)NBIで生成される高速イオンのプラズマ外に損失される高速イオン束を計測し、RSAEやGAMに伴う影響の解明を試みた。

(4)背景プラズマのイオン温度や電子温度分布、さらには密度分布にRSAEやGAMの影響が現れるか、特に閉じ込め改善がみられ

るかを検証を行った。

4. 研究成果

本研究の主要成果は下記の通りである。

(1) RSAEとGAMの非線形相互作用

LHDのRS配位プラズマでは逆方向電流の増加とともにRSAEとGAMが高速イオンにより不安定化される。図1に磁場揺動のスペクトログラムを示す。ポロイダルモード数 m 及びトロイダルモード数 n が $m=2/n=1$ のRSAE周波数は、RS配位で現れる回転変換の極小値 $(1/2\pi)_{\min}$ の低下とともに減少し、 $(1/2\pi)_{\min}=1/2$ の有理

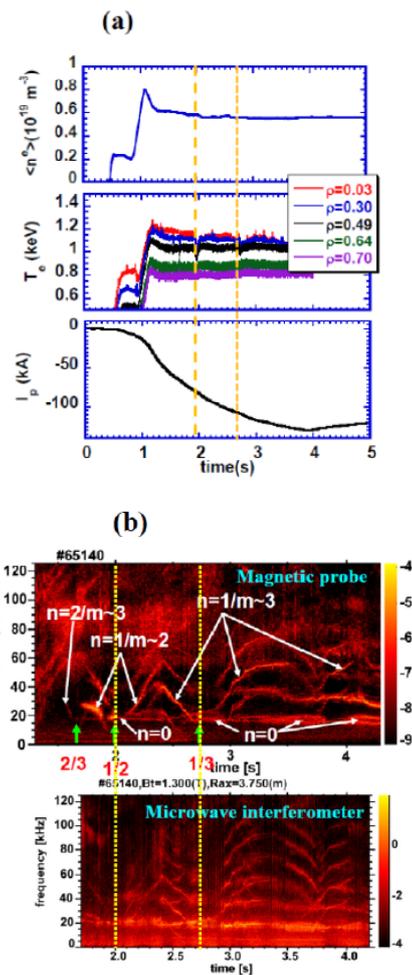


図1 (a) LHDのRSプラズマの放電特性、(b) 磁場揺動とミリ波干渉計信号揺動のスペクトログラム。

数で最小値を取り、 $(1/2\pi)_{\min}$ がさらに低下すると上昇に転じ、TAE周波数に近づくと安定化される。これと同時に $m=3/n=1$ RSAEが励起されその周波数は低下を始め、 $(1/2\pi)_{\min}=1/3$ を通過するとき最小値をとり再び上昇する。この振る舞いは $m=2/n=1$ RSAEの周波数と同様の時間発展を示す。 $m=2/n=1$ 及び $m=3/n=1$ RSAE

周波数の最小値は、GAM 周波数と高速イオン圧力勾配と背景のバルクプラズマ圧力勾配に関係したオフセット周波数の総和となる。本 RSAE はトカマクで観測されている RSAE と異なり電子反磁性ドリフト方向に伝搬している負周波数モードであるため上記の圧力勾配によるオフセット周波数がほぼ打ち消しあい、RSAE の最小周波数が GAM 周波数とほぼ一致する。負周波数の RSAE の励起は高速イオン速度分布の非等方性に起因すると考えられる。このことは、図 1 からわかるようにこの最小周波数と高速イオンによる不安定化された GAM の周波数とほぼ一致していることから理解される。これらの RSAE と GAM 以外に図 1 には RSAE 周波数がほぼ平行移動した周波数掃引モードが複数みられる。ミリ波干渉計信号揺動のスペクトログラムでは、このような周波数掃引モードが 5 高調波以上まで観測される。磁場揺動のバイコヒーレンス解析からこれらのモードは RSAE と GAM の非線形結合、すなわち 3 波相互作用過程で生じていることが明らかとなった。RSAE 及び GAM の周波数をそれぞれ f_1 及び f_2 とし、その他の周波数掃引モードの周波数を f_3 とすると、 $f_1 \pm Kf_2 = f_3$ の関係が成立している。ここで、 $K=1, 2, 3, \dots$ である。また、それぞれのトロイダルモード数を n_1, n_2 及び n_3 とすると $n_1 \pm n_2 = n_3$ の関係も満たされている。このような RSAE と GAM の相互作用はこれらの不安定モードが空間的に一部重なり合っていることによる。これは図 2 に示した電子サイクロトロン放射 (ECE) 測定で得られた電子温度揺動と磁場揺動相関の強度分布からよく理解される。なお、RSAE は径方向位置 $r/a=0.4$ 付近で局在化しているが少し裾を引いて $r/a=0.3 - 0.5$ に存在している。ここで注意すべきは GAM による電子温度揺動はプラズマ圧縮性と磁気面の微弱な変動に起因して生じていると考えられる。したがって密度勾配やプラズマ電位勾配 (径電場) の小

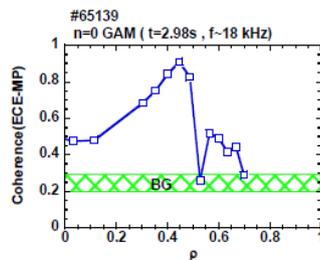


図2 GAM に対する ECE 揺動と磁場揺動とのコヒーレンスの径方向分布。

さい $(v/2\pi)_{\min}$ 付近では、GAM による密度揺動や電位揺動はプラズマ圧縮性に起因し電子温度揺動分布と若干異なることが予想される。

(2) GAM に伴う電位揺動

図 1 で示した高速イオン励起 RSAE や GAM は大きな逆方向プラズマ電流を有するプラズマで観測されている。このプラズマ電流によるポロイダル磁場が HIBP のプローブビーム軌道に影響を与え、電位揺動分布の計測は、当初、スムーズに進まなかった。ただ、HIBP の偏向電極電圧を注意深く制御することにより GAM によるプラズマ中心部の 1 測定点での電位揺動時間変化の計測に成功した。高速イオン励起 GAM の電位揺動振幅の実効値 $\phi_{\text{rms GAM}}$ は、プラズマ中心部であるが極めて大きく、電子温度 T_e と同程度、すなわち、 $\phi_{\text{rms GAM}}/T_e \sim 1$ である。HIBP のプローブビーム軌道の調整を続け、本研究の最終年度に GAM による電位揺動の空間分布の時間発展が得られた。図 3(a) は $(v/2\pi)_{\min}=1/3$ 付近の時間帯での分布であり、GAM は磁気軸付近に局在化している。図 3(b) は RSAE と GAM の非線形相互作用が明確に表れている時間帯での分布を示している。

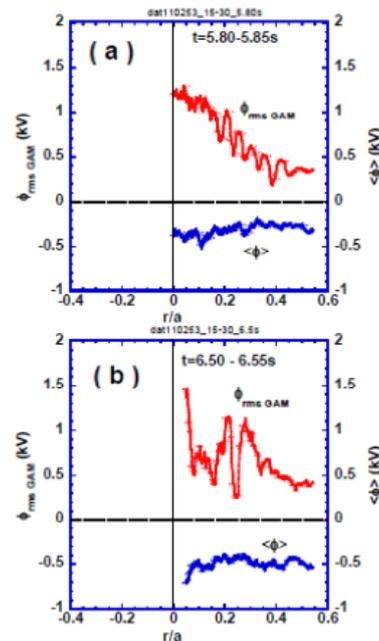


図3 LHD の RS 配位プラズマの特徴的な時間帯で観測された平均プラズマ電位と GAM による電位揺動振幅の径方向分布。(a)は $(v/2\pi)_{\min} \sim 1/3$ の時間帯、及び (b) は RSAE と GAM の非線形相互作用の強い時間帯における分布。

GAM の分布が外側に広がっている様子がわかる。しかも $r/a=0.2$ や $r/a=0.25$ 付近に局所的なピークを持っている。このピークのすぐ内側と外側で逆方向のトロイダル回転が予想される。まさに帯状流の構造が予想される。この放電ではなお、平均電位分布は平坦に近く、GAM の存在する領域には大きな径電場は存在せず、観測された電位揺動への GAM による磁気面変動の寄与は十分小さいといえる。図 3 からわかるように、GAM による電位揺動はプラズマ中心部に局在する傾向があるが、回転変換分布の時間発展に応じて分布が径方向に広がったり縮んだりしている。この詳細機構については、現在解析が進行中である。

(3) RSAE 及び GAM の高速イオンやバルクプラズマ閉じ込めへの影響

LHD の RS プラズマで観測される高速イオン励起 RSAE 及び GAM の発生するトロイダル磁場揺動強度は、真空容器内表面に設置した磁気プローブで測定された。RSAE と GAM によるトロイダル磁場に対する磁場揺動強度はそれぞれ $b_{\theta}/B_t \sim 2-3 \times 10^{-5}$ と $0.4-1.5 \times 10^{-5}$ 程度である。LHD において高速イオン損失が観測される TAE の磁場揺動振幅は $b_{\theta}/B_t \sim 0.3 \times 10^{-4}$ 程度以上であり、RSAE や GAM の磁場揺動振幅はそれに比べて小さい。実際、高速イオン損失プローブには損失束は観測されない。ただ、RS 配位プラズマ生成には逆方向、すなわち回転変換を低下させる方向に電流を誘起するように NBI を行っており、逆方向に周回する高速イオンが RSAE や GAM によって損失されても LHD に設置されている損失イオンプローブでは高速イオン軌道幾何からの制約のため検知できない。特定のピッチ角の高速イオンが若干損失されている可能性は否定できない。これにより高速イオン速度分布関数に非等方性が生じる可能性がある。実際、RSAE は高速イオン圧力の空間勾配により不安定化されうるが、GAM は $n=0$ のため高速イオンの空間圧力勾配では不安定化されず速度空間の非等方性により励起される。図 1 に示した RS 配位プラズマでは NBI により生成された高速イオンは十分減速受けるとともに等方化されるはずであるが GAM が準定常的に励起されていることから上記の議論のように特定のピッチ角の高速イオンの損失が予想される。図 1 に関連して述べたように、RSAE が負周波数モードであることも高速イオン速度分布関数が非等方であることを示唆している。今後、高速イオンの速度分布関数の直接計測

が必要である。また、高速イオンが再分布されている可能性はある。これは高速イオンの荷電交換分光法等で実測する必要がある。さらに、RSAE や GAM のバルクプラズマ閉じ込めへの影響にも注目した。高速イオン励起の RSAE や GAM は高速イオンの径方向の非両極性拡散を引き起こすことが予想され、これにより背景プラズマにプラズマシア流を誘起する可能性が理論的に予想されている。ただ、実験的にはトカマクやヘリカルプラズマにおいても明確な実験結果は得られていない。なお、図 3 のデータを得た放電では中心部のイオン温度が図 3(a)の時間帯($t \sim 5.8s$)から上昇しエネルギー閉じ込め時間の約 5 倍に相当する $\sim 0.3s$ 間、線形的に上昇することが観測されている。ただ、このようなイオンの閉じ込め改善を示唆する結果と高速イオン励起 GAM や RSAE との関連はまだ明確になっていない。

本研究の今後の展望と発展としては、これらの高速イオン励起 MHD モード発生を高速イオン閉じ込めに影響を与えない程度に制御し、逆にそれらを有用に利用することが考えられる。

① 高速イオン励起不安定を利用した MHD スペクトロスコーピー :

RSAE や GAM の周波数は回転変換やプラズマ温度の時間変化に敏感に反応するため、これらの周波数の時間変化から回転変換分布や電子・イオン温度、さらには燃料混合比などの平衡量が精度よく得られる可能性がある。この手法は MHD スペクトロスコーピーと呼ばれ、将来の核融合炉でのプラズマ状態の簡便なモニター法を提供すると期待される。

② 高速イオン励起 MHD モードによる背景プラズマ特性改善 :

RSAE や GAM による高速イオンの径方向輸送を制御し背景プラズマにプラズマシア流を誘起し背景プラズマ閉じ込め改善の可能性を探る。また、プラズマ自発回転も誘起される可能性があり、MHD 不安定性の安定化効果の向上が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. K. Ogawa, M. Isobe(磯部光孝), K. Toi(東井和夫), D.A.Spong, A. Shimizu, M. Osakabe(長壁正樹) et al., "Observation

- of energetic-ion losses induced by various MHD instabilities in the Large Helical Device (LHD)", Nuclear Fusion, 査読有、Vol. 50, 2010, 084005-01 ~ 12, DOI: 10.1088/0029-5515/50/8/084005.
2. K. Toi(東井和夫), F. Watanabe, T. Tokuzawa, K. Ida, S. Morita, T. Ido, A. Shimizu, M. Isobe(磯部光孝), M. Osakabe(長壁正樹) et al., "Observation of Reversed-Shear Alfvén Eigenmodes Excited by Energetic Ions in a Helical Plasma", Physical Review Letters, 査読有、Vol. 105, 2010, 145003-1 ~ 4, DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.145003.
 3. K. Toi(東井和夫), K. Ogawa(小川国大), M. Isobe(磯部光孝), M. Osakabe(長壁正樹), D.A. Spong(ORNL), Y. Todo, "Energetic-ion-driven global instabilities in stellarator/helical plasmas and comparison with tokamak plasmas", Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有、Vol. 53, 2011, 024008-01 ~ 33, DOI: 10.1088/0741-3335/53/2/024008.
 4. K. Ogawa, M. Isobe(磯部光孝), K. Toi(東井和夫) et al., "Beam Ion Losses caused by Magnetic Field Ripples in Various Plasma Parameter Ranges in the Large Helical Device", Plasma and Fusion Research, 査読有、Vol.7, 2012, 24 02014-1~4, DOI:10.1585/pfr.7.2402014.
 5. K. Ogawa, M. Isobe(磯部光孝), K. Toi(東井和夫) et al., "Magnetic Configuration Effects on Fast Ion Losses Induced by Fast Ion Driven Toroidal Alfvén Eigenmodes in the Large Helical Device", Plasma Science and Technology, 査読有、Vol.14, 2012, 269 ~ 272, DOI: 10.1088/1009-0630/14/4/01.
- [学会発表] (計 8 件)
1. K. Toi(東井和夫), "Reversed Shear Alfvén Eigenmodes and Geodesic Acoustic Mode in Reversed Magnetic Shear Configuration with Negative Concavity on the Large Helical Device" (口頭発表), 11th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 2009年9月22日, キエフ (ウクライナ) .
 2. K. Toi(東井和夫), "Interplay between Energetic Particles and Alfvén Eigenmodes in Toroidal Plasmas" (基調講演), 17th International Stellarator/Heliotron Workshop, 2009年10月16日, プリンストン (米国) .
 3. M. Osakabe(長壁正樹), "Clump and Hole formation in the energetic particle spectra by the toroidicity induced Alfvén Eigenmodes and their behaviors during the mode activities" (招待講演), 11th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 2009年9月21日, キエフ (ウクライナ) .
 4. M. Isobe(磯部光孝), "Energetic-particle modes driven by suprathermal electrons produced by off-axis second harmonic ECRH in Compact Helical System (CHS)" (口頭発表), 11th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 2009年9月23日, キエフ (ウクライナ) .
 5. K. Toi(東井和夫), "Role of Low-Order Rational Surfaces in Transport Barrier Formation on the Large Helical Device", 23th IAEA Fusion Energy Conference, 11-16 Oct., 2010, Daejeon (韓国) .
 6. K. Toi(東井和夫), "Characteristics of Energetic-Ion-Driven Geodesic Acoustic Modes in the Large Helical Device (LHD)" (口頭発表), 12th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 2011年9月7日, オースチン (米国) .
 7. M. Osakabe(長壁正樹), "Effect of energetic-particle induced n=0 instabilities to bulk-ions on LHD" (口頭発表), 12th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 2011年9月7日, オースチン (米国) .
 8. M. Isobe(磯部光孝), "Observation of MHD Instabilities in an Acoustic Range of Frequency in LHD ECRH Plasmas with Suprathermal Electrons" (口頭発表), 12th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 2011年9月9日, オースチン (米国) .
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
 東井 和夫 (TOI KAZUO)
 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
 研究者番号：20093057

- (2) 研究分担者
長壁 正樹 (OSAKABE MASAKI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：90280601
- (3) 研究分担者
磯部 光孝 (ISOBE MITSUTAKA)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：00300731
- (4) 連携研究者
大館 暁 (OHDACHI SATOSHI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：00270489
- (5) 連携研究者
井戸 毅 (IDO TAKESHI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：50332185
- (6) 連携研究者
徳沢 季彦 (TOKUZAWA TOKIHIKO)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：90311208
- (7) 連携研究者
清水 昭博 (SHIMIZU AKIHIRO)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00390633
- (8) 連携研究者
尾崎 哲 (OZAKI TETSU)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：50183033
- (9) 連携研究者
藤堂 泰 (TODO YASUSHI)
核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・教授
研究者番号：00249971
- (10) 連携研究者
松永 剛 (MATSUNAGA GO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究員
研究者番号：10391260