

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26400538

研究課題名（和文）環状プラズマの非局所応答についてのシミュレーション研究

研究課題名（英文）Simulation study of nonlocal plasma response in toroidal plasmas

研究代表者

宮戸 直亮（Miyato, Naoaki）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部・上席研究員（定常）

研究者番号：80370477

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：過渡的な密度揺動をトカマクプラズマに与えたときに起きる非局所応答のプロセスを数値シミュレーションにより詳細に解析した。過渡的に与えられる圧力揺動の長波長成分の間の、非線形結合および環状磁場の非一様性による結合の両方が、非局所応答に不可欠であることを明らかにした。さらにイオン系の微視的乱流を含むマルチスケールシミュレーションを実施し、微視的乱流が非局所応答を妨げることを明らかにした。これは非局所応答に不可欠な長波長の圧力揺動が、非局所応答を引き起こすよりも短い時間で乱流により散逸されるからである。

研究成果の概要（英文）：Our simulation study revealed detailed mechanism of nonlocal plasma response triggered by transient particle source in tokamak plasmas. Both nonlinear couplings and toroidal couplings between long wavelength components of pressure perturbations are indispensable for the nonlocal response. Besides, we studied effects of ion micro-turbulence on the nonlocal response. It is found that the turbulence tends to prevent the nonlocal response because it rapidly dissipate the long wavelength components of pressure perturbations necessary for the nonlocal response.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：核融合プラズマ 非線形 非局所 マルチスケール

1. 研究開始当初の背景

1990年代からトカマクプラズマやヘリカルプラズマなどの環状プラズマ実験において、プラズマ端で不純物入射やペレット入射などで過渡的な冷却(コールドパルス)を与えると、その影響が外側から炉心へ伝播するよりも早く炉心の電子温度が上昇するという非局所応答が観測されている。一方、イオン温度の内部輸送障壁(Internal Transport Barrier, ITB)がある場合は粒子入射によるイオン温度の減少が観測されている。また輸送障壁や磁気島のような構造があるときにコールドパルスの伝播が変化するという報告もある。これら非局所応答の実験的研究や、実験結果を説明するモデル研究はある程度進められていたが、基礎方程式に基づくシミュレーション研究はほとんど行われていなかった。

2. 研究の目的

これまで非局所応答について基礎方程式に基づく非線形乱流シミュレーションによる研究はほとんど行われてこなかったが、簡約化電磁流体力学(Reduced Magnetohydrodynamics, RMHD)コードを用いたシミュレーションで、過渡的な粒子ソースを与えるとプラズマの非局所的に反応することが発見された。第一の目的はこのシミュレーションで発見された非局所応答の詳細なプロセスを明らかにすることである。次に、イオン系の微視的乱流が非局所応答に及ぼす影響、さらには磁気島と呼ばれる構造がプラズマ中に存在するとき、そのような構造が非局所応答に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

非局所応答が発見されたシミュレーションは電子密度、磁力線方向イオン流速、静電ポテンシャル、磁場ポテンシャルの4場のRMHDコードであり、このコードを用いて発見された非局所応答の詳細なプロセスを調べる。次に、磁力線方向イオン流速、静電ポテンシャル、イオン温度の3場、あるいは上記の4場にイオン温度を加えた5場を取り扱うランダム流体コードを拡張し、イオン温度勾配によって駆動される微視的乱流が非局所応答に及ぼす影響について調べる。さらに4場のRMHDコードに電子温度のダイナミクスを加えた5場のRMHDコードを作成し、磁気島構造が非局所応答に及ぼす影響について調べる。

4. 研究成果

(1) RMHDシミュレーションで見られる非局所応答の詳細なメカニズム

4場のRMHDコードを用いたシミュレーション研究により、燃料ペレットを想定した過渡的な密度ソースで入力される $m \neq 0, n = 0$ (m, n はそれぞれポロイダルモード数、トロイダルモード数)の揺動間の非線形結合とト

ロイダル結合が、非局所応答に不可欠なこと、そして最終的には長波長の圧力揺動の $\cos\theta$ 成分(θ はトーラスの小円周方向の角度、ポロイダル角)が、プラズマの炉心部と端領域をつなぐ重要な役割を果たしていることを明らかにした。()このシミュレーションでは端領域で抵抗性バレーニング不安定性による乱流が発達していたが、この乱流は非局所応答には重要ではなかった。

(2) 非局所応答に対する炉心部乱流の影響

4場のRMHDシミュレーションでは、炉心部で重要となるイオン温度勾配(Ion Temperature Gradient, ITG)駆動乱流を取り扱うことができない。そこでRMHDコードとは別のランダウ流体コードを用いて、ITG乱流を含むシミュレーションを実施した。このシミュレーションでは、RMHDシミュレーションで見られたような非局所応答は起きなかった。シミュレーションの詳細な解析の結果、ITG乱流は非局所応答を妨げる働きをすることを明らかにした。これは非局所応答で重要な働きをしていた圧力揺動の $\cos\theta$ 成分が乱流により散逸され、炉心部と端領域をつなぐことができなくなるためである。ペレット入射を想定すると、イオン温度に対して過渡的な冷却(シンク)が入り、このために温度勾配は急峻になる。するとITG乱流がより強まるため、非局所応答は妨げられると考えられる。(、図1)

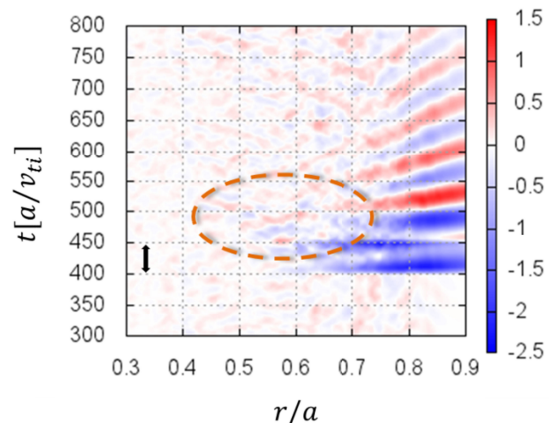


図1 圧力揺動の $\cos\theta$ 成分の時空間変化

ITG乱流に影響を与えるパラメータであるプラズマのベータ値(=プラズマ圧力と磁場の圧力の比)を0%から0.5%まで変化させたシミュレーションをすると、有限ベータ効果によりITG乱流は弱まり(揺動エネルギーが半分程度まで減少)、 $\cos\theta$ 成分の散逸も弱まったが、非局所応答は起きなかった。その他のパラメータも変化させてITG乱流がより抑制される状況では非局所応答が起きる可能性がある。()

(3) 電子温度ダイナミクスと磁気島構造の影響

4場のRMHDコードに電子温度のダイナミク

スを加えた 5 場の RMHD シミュレーションにおいて、過渡的な密度ソースに加えて、過渡的な電子温度シンクも与えると、プラズマ中心で過渡的に電子温度が上昇するという、実験的にも観測されている非局所応答が見られた。(、図2)

詳細な解析により、安全係数が 2 となる半径付近に磁気島構造が形成され、これが輸送障壁のような働きをしていることを明らかにした。このシミュレーションでは ITG 乱流は含まれていないため、イオン温度ダイナミクスを含めた 6 場のシミュレーションが今後の課題である。

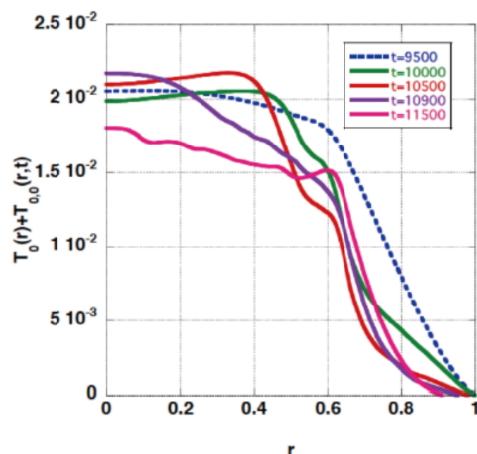


図 2 電子温度の変化

(4) マルチスケール運動論モデル

RMHD シミュレーションで見られる非局所応答では、プラズマの巨視的な揺動が重要な役割を果たしている一方、炉心部の微視的乱流が巨視的揺動を散逸しうることが明らかになった。微視的乱流を精密に取り扱うときにはジャイロ運動論モデルと呼ばれる簡約化モデルが広く用いられているが、その定式化では、短波長の微小揺動を仮定しているため、非局所応答のシミュレーションで用いられる大振幅で長波長の揺動は、従来のジャイロ運動論モデルの適用範囲外である。このような巨視的揺動をより精密に取り扱うことを可能にするため、巨視的な揺動を考慮した新しい運動論モデルの定式化を行った。() この定式化では、単一荷電粒子運動の相空間ラグランジアンに対しリー変換による摂動解析を行うという現代的な手法を用いた。摂動解析には高次の計算が必要で、微分方程式に対して摂動解析を行う伝統的な手法は計算が非常に複雑になり、系の保存量も自明ではないが、この現代的な手法では、様々な保存量をネーターの定理で導くことができる利点がある。

この研究に関連して、微視的乱流の理論・シミュレーション研究で標準的に用いられるジャイロ運動論モデルから、短波長揺動の効果を検討した粒子フラックスを導く新しい手法を開発した。従来の手法では、ジャイ

ロ運動論モデルの定式化に用いられる相空間変換の高次の情報が必要であったが、新しい手法では最低次の情報で十分であることを明らかにした。さらに、この手法を用いて、短波長の揺動を考慮した RMHD モデルを構築できることを示した。()

また、このマルチスケール運動論モデルについての知見は、巨視的な電磁流体力学(MHD)と微視的な運動論のハイブリッドモデルの構築にも生かされている。()

<引用文献>

N. Miyato, M. Yagi, A. Matsuyama, T. Takizuka, "Nonlocal transport from edge to core in tokamak plasmas," 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg, Russia (13-18 October 2014).

N. Miyato, "Effect of ion temperature gradient driven turbulence on the edge-core connection for transient edge temperature sink," Plasma and Fusion Research 9, 1203148 (2014).

N. Miyato, M. Yagi, "Effects of turbulence on the edge-core coupling in tokamak plasmas with transient edge source/sink," 15th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, Garching, Germany (19-21 October 2015).

M. Yagi, N. Miyato, A. Matsuyama, T. Takizuka, "Nonlocal plasma response to edge perturbation in tokamak," 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan (17-22 October 2016).

N. Miyato, "Gyrokinetic model beyond the standard ordering," Contributions to Plasma Physics 56, 543-548 (2016).

N. Miyato, M. Yagi, B.D. Scott, "On push-forward representations in the standard gyrokinetic model," Physics of Plasmas 22, 012103 (2015).

J. Shiraishi, N. Miyato, G. Matsunaga, "Flow-Induced New Channels of Energy Exchange in Multi-Scale Plasma Dynamics - Revisiting Perturbative Hybrid Kinetic-MHD Theory," Scientific Reports 6, 25644 (2016).

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)

N. Miyato, "Gyrokinetic model beyond the standard ordering," 査読有, Contributions to Plasma Physics **56**, 543-548 (2016)
DOI: 10.1002/ctpp.201610051

J. Shiraishi, N. Miyato, G. Matsunaga, "Flow-Induced New Channels of Energy Exchange in Multi-Scale Plasma Dynamics - Revisiting Perturbative Hybrid Kinetic-MHD Theory," 査読有, Scientific Reports **6**, 25644 (2016)
DOI: 10.1038/srep25644

A. I. Smolyakov, M. F. Bashir, A. G. Elfimov, M. Yagi, N. Miyato, "On the dispersion of geodesic acoustic modes," 査読有, Plasma Physics Reports **42**, 407-417 (2016)
DOI: 10.1134/S1063780X16050172

N. Miyato, M. Yagi, B.D. Scott, "On push-forward representations in the standard gyrokinetic model," 査読有, Physics of Plasmas **22**, 012103 (2015).
DOI: 10.1063/1.4905705

N. Miyato, Effect of ion temperature gradient driven turbulence on the edge-core connection for transient edge temperature sink," 査読有, Plasma and Fusion Research **9**, 1203148 (2014)
DOI: 10.1585/pfr.9.1203148

[学会発表](計7件)

宮戸直亮, "強いプラズマ流を考慮した運動論モデルの電磁的拡張," 第33回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学青葉山キャンパス(宮城県仙台市), 2016年11月29日-12月2日.

M. Yagi, N. Miyato, A. Matsuyama, T. Takizuka, "Nonlocal plasma response to edge perturbation in tokamak," 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan (17-22 October 2016).

N. Miyato, B.D. Scott, "Gyrokinetic modeling issues of edge plasma," 18th International Congress on Plasma Physics, Kaohsiung, Taiwan (27 June-1 July 2016).

N. Miyato, M. Yagi, "Effects of turbulence on the edge-core coupling in tokamak plasmas with transient edge source/sink," 15th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, Garching, Germany

(19-21 October 2015).

N. Miyato, "Gyrokinetic model beyond the standard ordering," 15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 奈良春日野国際フォーラム 薨~I・RA・KA~(奈良県奈良市), (9-11 September 2015).

M. Yagi, N. Miyato, A. Matsuyama, T. Takizuka, "Nonlocal response of electron temperature fluctuation from edge to core in tokamak plasmas," 15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 奈良春日野国際フォーラム 薨~I・RA・KA~(奈良県奈良市), (9-11 September 2015).

N. Miyato, M. Yagi, A. Matsuyama, T. Takizuka, "Nonlocal transport from edge to core in tokamak plasmas," 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg, Russia (13-18 October 2014).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮戸 直亮 (MIYATO, Naoaki)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部・上席研究員
研究者番号: 80370477

(2) 連携研究者

矢木 雅敏 (YAGI, Masatoshi)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部・次長
研究者番号: 70274537