

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18760646  
 研究課題名 (和文) 高温プラズマ中の微視的電磁乱流シミュレーションによる分布・構造形成の研究  
 研究課題名 (英文) Study of profile and structure formation in high temperature plasmas based on electromagnetic microturbulence simulations  
 研究代表者  
 宮戸 直亮 (MIYATO NAOAKI)  
 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・研究職  
 研究者番号：80370477

研究成果の概要:磁場閉じ込め高温プラズマ中の微視的イオン系乱流シミュレーションを行い、イオンの温度勾配により駆動される乱流とその乱流から2次的に生成される帯状の電磁場成分との間の非線形相互作用に関する研究を行った。帯状電場による帯状のプラズマ流には乱流を抑える働きがあるが、トーラスプラズマに流れる電流の大きさによる帯状流の性質変化をイオンの乱流熱輸送の制御に用いることができる可能性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	500,000	0	500,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	150,000	2,250,000

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：帯状流、GAM、帯状磁場、イオン温度勾配駆動乱流、内部輸送障壁、リー変換

### 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合プラズマ中ではプラズマの圧力勾配と電磁場の相互作用により微視的な乱流が発達し、この乱流および乱流から非線形的に生成される帯状流がプラズマの分布・構造形成に深く関わっていると考えられる。特に局所的に乱流輸送が減少する輸送障壁形成のメカニズムはいまだ明らかではない。

### 2. 研究の目的

3次元電磁乱流コードを用いた、イオン温度勾配駆動乱流のシミュレーションにより、高温プラズマ中の微視的電磁乱流による分

布・構造形成、特に、イオン系の内部輸送障壁が形成されるかどうかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 磁場揺動を含む計算はかなり長時間の計算が必要なため、まず、磁場揺動を無視した静電近似での計算を様々な磁場配位、様々なプラズマサイズで行う。そして、帯状流の周波数解析により、帯状流の性質と乱流輸送との関係を明らかにする。

(2) 次に磁場揺動を含む計算を、いろいろなプラズマベータ値 (=プラズマ圧力/時期圧力、ベータ値ゼロが静電近似の極限) で行い、有限ベータが帯状流や乱流輸送に及ぼ

す影響を明らかにする。さらに帯状磁場の生成についても明らかにする。

(3) 輸送障壁領域で実験的に観測されているような強いプラズマ流を含む運動論モデルの定式化を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 安全係数がプラズマ中心以外で最小値をとる反転磁気シア配位 (図1) で、安全係数分布の形は変えず大きさをだけ変えた静電的イオン温度勾配駆動乱流のシミュレーションを行い、実験的に輸送障壁形成が観測されている安全係数最小面の近傍、より正確に言えば、磁力線方向のイオン音波の周波数が最大となるところで、帯状流の性質が Geodesic Acoustic Mode (GAM) と呼ばれる時間的に振動するものから、より乱流抑制効果の高い静的帯状流に変わり、イオンの乱流熱輸送が抑えられることを明らかにした (図2)。従来の理論・シミュレーション研究では、安全係数が最小となる領域 (図1、2では  $r/a=0.6$  の近傍) で磁気シア (安全係数の半径方向の微分) がゼロまたは小さいことに

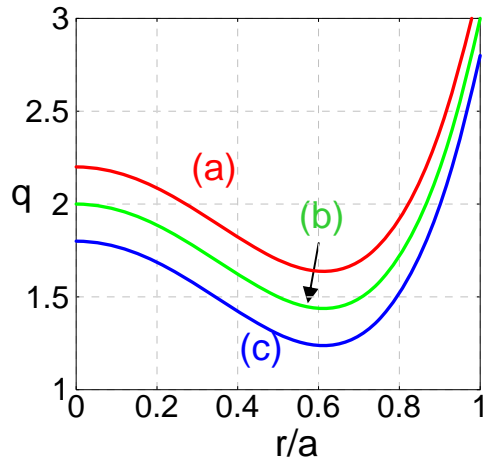


図1 安全係数分布

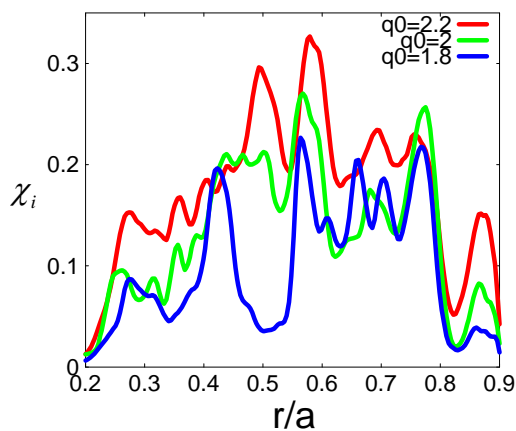


図2 イオン熱輸送係数

より、不安定モードのトロイダル結合が小さくなり乱流輸送も小さくなるという説明がなされていたが、GAM (振動帯状流) や非共鳴モードを含んでいないなどの問題があった。本研究では、これらをシミュレーションに含んでおり、この場合、安全係数最小面で特に乱流輸送が抑えられるという現象は見られなかった。このことは、非局所的効果が小さくなる大きなサイズのプラズマのシミュレーションにおいてより顕著になる。今回の成果は、帯状流の性質の違いがイオンの温度分布の形成に重要な役割を果たしていることを示している。したがって、安全係数分布を変化させて帯状流の性質を変えれば、乱流輸送を制御できる可能性がある。

(2) プラズマのベータ値が有限な場合のシミュレーションを行い、安全係数が整数などの低次の有理数になるところで帯状磁場がよく生成され、トロイダルモード数により帯状磁場がよく生成される半径が変化することを示した。図3では全てのトロイダルモード数を含むシミュレーションにおける帯状磁場の時間発展の様子が安全係数分布と共に示されている。図3の場合、最も低次の有理面はポロイダルモード数が2、トロイダルモード数が1で安全係数 ( $q$ ) が2となる面であるので、安全係数が2の面 ( $r/a=0.7$  の近傍) で帯状磁場が最もよく生成されている。同じ安全係数分布で偶数のト

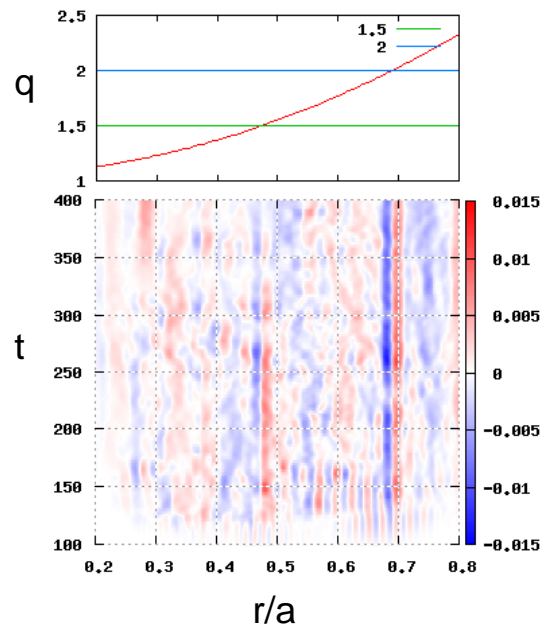


図3 安全係数分布と帯状磁場の時間発展

ロイダルモード数だけを含むシミュレーションを行った場合、最低次の有理面が、ポロイダルモード数が3、トロイダルモード数が2で安全係数が1.5となる面 ( $r/a=0.5$ の近傍) になるので、安全係数が2の面ではなく、1.5の面で帯状磁場が最も強くなる。このように疎なトロイダルモード数をとると帯状磁場の生成位置が変化する。

通常、トカマクプラズマ中の帯状流は乱流のレイノルズ応力によって駆動され、Geodesic Transfer が帯状流のエネルギーの流出機構となっているが、帯状磁場がよく生成されるところでは、これらの役割が逆転していることを発見した (図4)。図4では  $q=2$  の面で帯状磁場がよく生成されている。この効果はイオン温度勾配不安定性が支配的な低ベータ領域では非常に局所的なものにとどまり、乱流輸送にも大きな影響はない。

乱流シミュレーションでは計算量の削減のためによくとびとびのトロイダルモードがとられることがあるが、今回の結果は帯状磁場がより強くなると思われる高ベータでは全てのトロイダルモードをとる必要があることを示している。

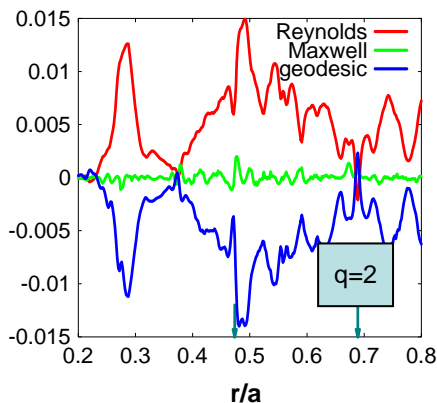


図4 時間平均した帯状流の駆動源

(3) 上の (1)、(2) の成果はランダウ流体モデルと呼ばれる流体モデルに基づくシミュレーションにより得られたものである。これらをより発展させていくにはより厳密な運動論モデルに基づくシミュレーションを行うことが重要である。近年、いわゆるジャイロ運動論モデルが乱流シミュレーションに用いられるようになってきているが、標準的に用いられているモデルは、その定式化においてプラズマ中の輸送障壁領域で見られる強い  $E \times B$  流を全く考慮していない。そのため、輸送障壁領域を含む乱流シミュレーションのためには強い  $E \times B$  流を含むようにモデルを拡張する必要がある。しかしながら、従来の強い  $E \times B$  流を含むモデルは、時

間変化しない平衡の  $E \times B$  流を想定したもので、 $E \times B$  流の時間変化を許したシミュレーションに適した形をしていない。輸送障壁形成のシミュレーションを行うには時間的に変化する  $E \times B$  流を取り扱う必要がある。そこで、相空間ラグランジアンに対するリー変換を用いた摂動解析により、 $E \times B$  流の時間変化を許してもシミュレーションにおいて取り扱いやすい形をした、単一荷電粒子運動の案内中心基本 1-形式を導出した。導出した 1-形式のシンプレクティック部分は形式的に強い  $E \times B$  流を含まない標準的な 1-形式と同じものであり、 $E \times B$  流の時間変化を許した場合でもハミルトン方程式は標準的な一般形を保つ。その代わり、案内中心ハミルトニアンは複雑になるが、反転磁気シアトカマクの内部輸送障壁や高閉じ込めモードのトカマク周辺部などよく局在化した輸送障壁領域ではハミルトニアンを簡単にすることができる。これにより、強い  $E \times B$  流の生成を伴う輸送障壁形成シミュレーションを行うための理論的基盤を構築できた。

## 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 6 件)

- 1) N. Miyato, B. D. Scott, D. Strintzi, S. Tokuda, “A guiding-centre 1-form towards a kinetic model for edge turbulence simulations,” Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, S-4, 19-20 (2009) 査読無
- 2) K. Miki, Y. Kishimoto, J. Q. Li, N. Miyato, “Dynamics of turbulent transport dominated by the geodesic acoustic mode near the critical gradient regime,” Phys. Plasmas 15, 052309 (2008) 査読有
- 3) N. Miyato, Y. Kishimoto, J. Q. Li, “Turbulence suppression in the neighbourhood of a minimum- $q$  surface due to zonal flow modification in reversed shear tokamaks,” Nucl. Fusion 47, 929-935 (2007) 査読有
- 4) K. Miki, Y. Kishimoto, N. Miyato, J. Q. Li, “Intermittent transport associated with the geodesic acoustic mode near the critical gradient regime,” Phys. Rev. Lett. 99, 145003 (2007) 査読有

5) N. Miyato, Y. Kishimoto, J. Q. Li, "Nonlocal behaviour of zonal flows in tokamak plasmas," Plasma Phys. Control. Fusion 48, A335-A340 (2006) 査読有

6) N. Miyato, Y. Kishimoto, J. Q. Li, "Zonal flow and GAM dynamics and associated transport characteristics in reversed shear tokamaks," J. Plasma Phys. 72, 821-824 (2006) 査読有

[学会発表] (計7件)

1) 宮戸直亮, B. D. Scott, D. Strintzi, 徳田伸二, "強いE×B流を含む案内中心基本1-形式," 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月27日, 東京

2) N. Miyato, Y. Kishimoto, J. Q. Li, S. Tokuda, "Zonal mode generation by electromagnetic turbulence in tokamaks," 11<sup>th</sup> IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers, 28 September 2007, Tsukuba

3) 宮戸直亮, "トカマクプラズマ中の電磁的微視的乱流による帯状モードの生成," 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月22日, 札幌

4) 宮戸直亮, "トカマクプラズマにおけるイオン温度勾配駆動乱流と帯状流・GAMとの相互作用についてのシミュレーション研究," 日本物理学会第62回年次大会 若手奨励賞受賞記念講演, 2007年9月21日, 札幌

5) N. Miyato, Y. Kishimoto, J. Q. Li, S. Tokuda, "Finite beta effects on ITG turbulence-zonal mode system in tokamak plasmas," 34<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics, 5 July 2007, Warsaw

6) N. Miyato, Y. Kishimoto, J. Q. Li, "Interplay between zonal flows/GAMs and ITG turbulence in tokamak plasmas," 21<sup>st</sup> IAEA Fusion Energy Conference, 18 October 2006, Chengdu

7) 宮戸直亮, 岸本泰明, 李 継全, "加熱駆動のITG乱流シミュレーションによるトカマクプラズマ中の乱流輸送の研究," 第6回核融合エネルギー連合講演会, 2006年6月13日, 富山

[その他]

ホームページ等

<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/theory/staff/miyatoJ.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮戸 直亮 (MIYATO NAOAKI)

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・研究職

研究者番号: 80370477