

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 3 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011 年度

課題番号：21560856

研究課題名（和文）核燃焼プラズマにおける 粒子リップル共鳴拡散の解明

研究課題名（英文）Analysis of ripple resonance diffusion of alpha particles in burning plasma

研究代表者

筒井広明 (TSUTSUI Hiroaki)

東京工業大学・原子炉工学研究所・助教

研究者番号：20227440

研究成果の概要（和文）:

トカマクにおいて 粒子の閉じ込めは重要である。その解析にはよく Larmor 半径を無視した案内中心軌道方程式が用いられ、Larmor 軌道中の磁場変化が大きくなる球状トカマクではその影響が無視できなくなる。両者の違いはバナナチップのトロイダル角に現れ、それに伴う現象もずれていたが、基本的な現象としては同じであった。次にバナナ粒子がリップルと共鳴を起こし、拡散を大きくするリップル共鳴拡散の物理機構を、数値解析、理論モデルによって解析した。そして、この拡散は今まで考えられていた共鳴点でのピークではなく共鳴両側にピークを持つ M 型となり、共鳴時に位相空間に形成されるアイランドに衝突により入りアイランドを飛び越える粒子が拡散を引き起こしていることがわかった。

研究成果の概要（英文）:

The confinement of alpha particles is important in tokamak systems. Guiding center equations which ignores Larmor radius are used in order to evaluate alpha-particles orbits, while the equations are not valid for spherical tokamaks in which the characteristic length of variation of magnetic field is not negligible compared with Larmor radius. Although these differences, which are finite Larmor radius effects, appear as locations of banana tips, the differences are quantitative, not qualitative. Next we analyzed the ripple-resonance diffusion, which are caused by the resonance of banana-particle motions and magnetic field ripples, numerically and theoretically. The diffusion coefficients are enhanced around the ripple resonance energy while they are not so much enhanced in the neighborhood of it. Consequently, they have a local minimum near the resonance energy, and hence they have an M-shaped energy dependence. Ripple resonance is caused by a radial change of the toroidal precession of banana particles, and creates islands in a phase space.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合工学

キーワード：プラズマ・核融合、計算物理、シミュレーション工学、数値物理、確率論

1. 研究開始当初の背景

近年、磁場閉じ込め型核融合は核燃焼の実証段階に進んできた。DT 反応を用いる核融合炉では中性子をブランケットで受け、そのエネルギーを発電（熱）に使い、粒子はプラズマの加熱に用いられる。プラズマを加熱し終わりエネルギーを失った粒子は排気されないといけない。そのため、核燃焼プラズマにおける粒子のエネルギー輸送、及び、粒子閉じ込めのより深い理解、解明が必要である。粒子のような高エネルギー粒子の閉じ込めには、トロイダル磁場コイルなどが作るリップル磁場（コイルの数が有限であるために生じる非軸対称磁場）が大きく影響することが知られている（図1）。特に、リップル磁場との共鳴（捕捉粒子が大きくドリフトする反射点の位置が、リップル磁場強度と共鳴する）については、本研究の共同研究者の一人である谷の研究がある。その研究成果によれば、リップルと共鳴するエネルギーで拡散係数が大きくなることが示されているが、その物理的機構の理解は不十分であり、いまだ解明されていない。また、内部輸送障壁を利用する先進トカマクでは従来のトカマクとは異なる磁場配位をとるため捕捉粒子（バナナ粒子）軌道のバナナ幅の装置サイズの比が大きくなり、リップル磁場の影響が、さらに大きくなると予想される。さらに、球状トラスなど、比較的磁場の弱い場合、有限 Larmor 半径効果が閉じ込めに影響を与えると予想される。

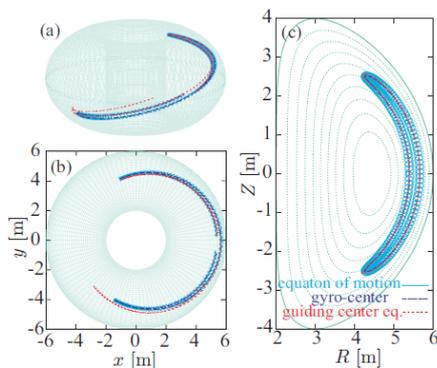


図1 バナナ粒子軌道の例

2. 研究の目的

上で述べたように、粒子閉じ込めの問題点は、リップル磁場との共鳴、磁場配位の影響、有限 Larmor 半径効果が、拡散、輸送にどのような影響を与えるかが未解明な点にある。本研究ではそれらを踏まえ、主に数値計算手法を用いて、これらの物理機構を解明する。

3. 研究の方法

まず、従来のトカマク（円形断面、高アスペクト比）で、案内中心近似を用いてリップル共鳴を詳しく調べ、計算結果を説明できる物理モデルを示す。次に、ITER や球状トラスの平衡配位でリップル拡散を計算し、その影響を定量的に評価する。

さらに、従来の計算では含まれていない有限 Larmor 半径効果を数値計算で調べる。案内中心近似を用いず粒子軌道を忠実に計算するため、従来より 1000 倍近い計算量を必要とするが、近年の超並列計算機の進歩により可能となった。特に、本研究で用いる粒子モンテカルロ法は並列計算に適しており、計算機的能力を十分に発揮できる。また、磁場中の荷電粒子の運動は衝突の無い場合は保存系であり、エネルギーは保存される。従来の Runge-Kutta 法などの計算スキームでは保存則が厳密には成り立たず、長時間の計算では矛盾が生じる。保存系の数値計算スキームは幾つか提案されているが、磁場中の運動のように、ポテンシャルエネルギーが正準運動量にも依存する場合に適用できるものは陰的 Runge-Kutta 法しかなく、陽的なスキームは知られていない。本研究は、物理機構の解明とあわせて、数値解析手法の開発もあわせて行うものである。

4. 研究成果

粒子の拡散仮定で重要となるエネルギー領域では、衝突頻度が少なく粒子の無衝突軌道が十分に描ける。そのためバナナ粒子の連続するバナナ・チップのトロイダル角差がトロイダル磁場コイル間の整数倍になると、粒子はリップルと共鳴を起こす（リップル共鳴）。そしてリップル共鳴条件は、バナナ粒子のトロイダル方向にずれていく運動であるトロイダル・プリセッションで決定される。リップル共鳴時の拡散係数、リップル共鳴拡散については、トロイダル・プリセッションの空間変化を無視した仮定で、Yushmanov によって理論的に解析され、共鳴エネルギーで拡散係数がピークを持つことが示された。しかしトロイダル・プリセッションは実際のトカマクでは空間的に変化している。また、本研究において、リップル共鳴現象においてトロイダル・プリセッションの空間変化が非常に重要な役割を担っていることが明らかとなった。以上を背景に、本研究では、トロイダルプリセッションの空間変化を含めた現実的な系で、リップル共鳴拡散の詳細な数値解析を行った。

その結果、リップル共鳴拡散はリップル共鳴エネルギーの周りで単純なピークではなく、M 型のエネルギー依存性を持つことを初

めて明らかにした。そしてリップル共鳴により拡散の増大される領域はエネルギーに W , リップルに $^{1/2}$ の依存性を持つ幅を持っており、粒子は減速過程の長い間そのエネルギー領域に滞在することになるため、粒子の輸送過程はリップル共鳴拡散が支配的となることを示した。

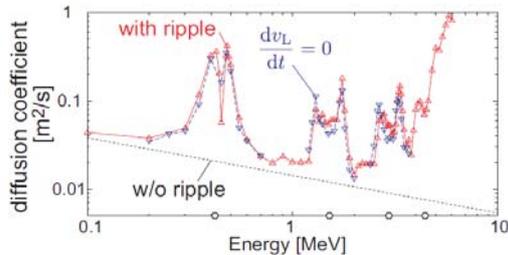


図 2 拡散係数のエネルギー依存性

またリップル共鳴周りの M 型のエネルギー依存性は、位相空間に開いた軌道と閉じた軌道が共存し、開いた軌道上の粒子が閉じた軌道、すなわちアイランドに移り、平均位置がずれて拡散を増大させることで生じていることを明らかにした。

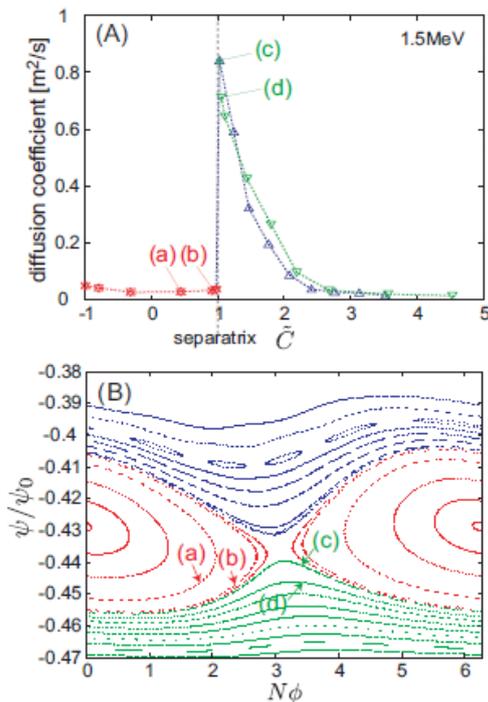


図 3 拡散係数の位相空間無衝突軌道への依存性

次に、得られた数値解析の結果より、ステップサイズをアイランド幅程度、特徴的時間を

粒子が衝突によりセパト릭スに到達する時間とモデル化し、その物理機構を解明した。衝突を受けることでポアンカレマップ上の粒子、アイランドの位置、アイランドの振幅がそれぞれ変化する。ピッチ角散乱により粒子のパナナ・チップのトロイダル角が変化しアイランドの位相が変わる。その結果アイランドの振幅が変化して粒子がセパト릭スに入り、平均位置が変化して拡散を増大させていることを示した。さらにセパト릭ス上の粒子でもアイランドを飛び越える特徴的な時間が存在し、その時間は衝突時間とは関係ないことを明らかにした。

有限 Larmor 半径効果については、まず軸対称磁場中で、運動方程式と案内中心軌道方程式とで粒子軌道を比較した。その結果、粒子軌道は主にトロイダル方向に違いが生じることを示した。そしてリップル磁場中でパナナ粒子が受ける変位は、パナナ・チップのトロイダル角に依存するため、軌道のトロイダル方向の差によって、変位量にも両者で差が現れる。しかしその変位量を決めるパナナチップでのリップルウェル・パラメータが同じであれば、リップルにより受ける変位にもほとんど差は見られず、案内中心軌道方程式の解が良い近似であることを示した。

リップル共鳴条件は連続するパナナ・チップのトロイダル角差で決まるため、軌道自体がトロイダル方向に差があった運動方程式と案内中心軌道方程式とでリップル共鳴エネルギーが異なる。そのため同じ磁場配位で拡散係数を求めると両者で拡散係数のピークが異なる。また、案内中心軌道方程式に対応する初期値として、運動方程式では初期 Larmor 位相の自由度もあるため、共鳴エネルギー幅が広がる。以上のように、空間上の 1 点から出発した粒子は、粒子軌道が運動方程式と案内中心軌道方程式とでトロイダル方向に違いが生じるため、それに起因した有限 Larmor 半径効果が現れる。

Larmor 周期とリップルの周期が一致して B ドリフトを受けるサイクロトロン共鳴は案内中心軌道方程式では起こらない現象である。運動方程式で、この共鳴は見られたが、その径方向変化は非常に小さく拡散への寄与はパナナ・ドリフトと比較した 1, 2 桁小さい。また周回粒子とパナナ粒子の境目でこの共鳴によって周回粒子からパナナ粒子へと遷移し損失する粒子もあるが、その条件を満たす粒子は非常に少ないため、粒子損失への影響は小さい。

以上のように本研究では、リップル共鳴拡散については、従来考えられていた共鳴エネルギーで拡散係数が極大となるのではなく、共鳴エネルギーの周りで M 型のエネルギー

依存性となることを示した。そして 粒子はその減速過程で長い間このエネルギー帯に滞在するため、リップル共鳴拡散は 粒子の輸送過程において支配的となる。そしてその物理機構については、位相空間上、開いた軌道と閉じた軌道が共存し、開いた軌道から閉じた軌道へ粒子が移ると平均位置がずれて拡散が増大することを明らかにした。逆に閉じた軌道から開いた軌道へは両側に等確率で移るので、平均位置はほとんど変化せずに拡散は増大しない。

また、粒子の有限 Larmor 半径効果については、粒子軌道が主にトロイダル方向に違いが生じ、そのトロイダル方向の違いに起因して有限 Larmor 半径効果が現れることが明らかにした。

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2件)

(1) K. Tani, K. Shinohara, T. Oikawa, H. Tsutsui, S. Miyamoto, Y. Kusama, T. Sugie: Effects of ELM mitigation coils on energetic particle confinement in ITER steady-state operation, Nucl. Fusion **52** 013012 (2012) 査読あり

(2) Hideyuki MIMATA, Keiji TANII, Hiroaki TSUTSUI, Kenji TOBITA, Shunji TSUJI-IIIO, Ryuichi SHIMADA: Numerical Study of the Ripple Resonance Diffusion of Alpha Particles in Tokamaks, Plasma and Fusion Research **4**, 008 (2009) 査読あり

[学会発表](計3件)

(1) H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, R. Shimada, K. Tani: Finite larmor radius effect in ripple resonance diffusion of alpha particles in tokamaks, PLASMA2011, Kanazawa, 23 Nov, 2011

(2) H. Tsutsui, H. Mimata, S. Tsuji-Iio, R. Shimada, K. Tani: Physical mechanism of ripple resonance diffusion of alpha particles in tokamaks, 37th EPS Conference on Plasma Physics, Dublin, 21 June, 2010

(3) 筒井広明、三又 秀行、飯尾 俊二、嶋田隆一、谷 啓二: トカマクにおけるリップル共鳴拡散とその物理機構の解明、プラズマ・核融合学会第26回年会, 1pB04, 京都市国際交流会館, 2009.12.01

[その他]

ホームページ等

<http://www.nr.titech.ac.jp/~htsutsui/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

筒井広明 (TSUTSUI Hiroaki)

東京工業大学・原子炉工学研究所・助教

研究者番号: 20227440

(2) 研究分担者

飯尾俊二 (TSUJI-IIIO Shunji)

東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授

研究者番号: 90272723

嶋田隆一 (SHIMADA Ryuichi)

東京工業大学・原子炉工学研究所・教授

研究者番号: 40206181