

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760810

研究課題名(和文)核燃焼プラズマのための新古典輸送シミュレーションの拡張と検証

研究課題名(英文)Development, verification, and validation of neoclassical transport code for fusion plasmas

研究代表者

佐竹 真介(Satake, Shinsuke)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：70390630

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：定常核燃焼プラズマの実現を目指す核融合研究において今後必要不可欠となる、新古典輸送理論に基づくプラズマの輸送シミュレーションに必要な計算手法の拡張・開発を行い、炉心プラズマで想定される高温低衝突で重要となる、荷電粒子のドリフト運動を正確に扱える高精度な新古典輸送・径電場形成・新古典粘性に適した計算法を確立した。

このシミュレーション法をトカマクにおける微小な摂動磁場が生む新古典粘性の評価に適用し、実験で観測されたプラズマ回転をシミュレーションで精度よく再現できることを示した。また、D,T,Heや不純物イオンなどを含む多イオン種プラズマの新古典輸送計算が行えるようにクーロン衝突項の拡張を行った。

研究成果の概要(英文)：In the research of magnetic nuclear fusion reactor, neoclassical transport simulation is an essential thing. To treat the high-temperature, low-collisionality plasma in which the precise guiding center motion with including the finite drift motion becomes important for neoclassical transport calculation, we have developed a high-accuracy numerical simulation method to evaluate the neoclassical transport, neoclassical viscosity, and the evolution of radial electric field. The simulation code was applied to evaluate the neoclassical toroidal viscosity in a tokamak caused by weak perturbed magnetic field, and it was demonstrated that the observed toroidal rotation profile can be reproduced by the transport simulation. Also, we developed a new Coulomb collision operator so that the neoclassical transport in multi-ion-species plasmas can be treated.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：新古典輸送 多イオン種プラズマ 核融合 新古典粘性 モンテカルロ法

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマにおける新古典輸送理論とは、トーラス磁場配位における荷電粒子のクーロン散乱と電磁場の影響によるガイディングセンター運動によるプラズマの粒子・熱輸送現象を扱う理論である。また、核融合科学研究所のLHDのような非軸対称装置においては、電子とイオンの小半径方向の新古典粒子輸送が釣り合うようにプラズマ中に生じる両極性径電場がプラズマ閉じ込め性能を大きく左右するため、径電場分布の決定においても新古典輸送理論が重要な役割を果たす。新古典輸送の研究は核融合炉の設計・炉心プラズマの輸送現象の研究の基盤をなす、必要不可欠なものである。さらに磁力線に沿っての磁場強度の不均一性から生じる新古典粘性がプラズマ回転の減衰に与える影響もプラズマ閉じ込め研究の重要なテーマの一つとなっている。

現在、核燃焼プラズマの閉じ込め実証実験を目指してITERが国際協力で建設されており、核融合科学研究所ではヘリカル型核融合原型炉(FFHR)の概念設計が進められている。新古典輸送理論が扱う範疇において核燃焼プラズマの研究で取り上げるべき課題は以下の通りである。

(1) 核燃焼コアプラズマは現在までの実験に比べて高温・低衝突周波数となり、従来の新古典輸送計算において無視されてきた磁力線を横切る荷電粒子のドリフト運動を考慮した計算が必要となる。この効果を含めた新古典輸送計算は、従来の局所近似が使えない大域的シミュレーションとなり、効率的な大規模数値計算手法が要求される。

(2) 核燃焼コアプラズマは重水素(D)と三重水素(T)、核反応で生じた高速粒子、それが減速したHe、電子、そして炉壁材料からの不純物イオンが混在した多イオン種プラズマである。多イオン種間のクーロン相互作用を考慮して精度よく新古典輸送を解く計算手法はまだ確立されていない。

(3) トカマクでは周辺部のプラズマ不安定性を制御する手法として外部摂動磁場を印加する研究が進められている。この摂動磁場が生む新古典トロイダル粘性がプラズマ回転を減速させる影響について研究を進めるために、微小な摂動磁場が生じさせる新古典粘性の評価法が必要である。簡素な近似解が広く新古典粘性の評価に使われているが、その定量的な正確性については検証されておらず、より信頼性の高い計算手法が必要とされる。

## 2. 研究の目的

本研究では、前項に挙げた課題点を踏まえ、核燃焼プラズマ中の新古典輸送現象の研究に必要とされる計算手法の拡張を行うとともに、構築された信頼性の高いシミュレーションを用いた研究によって、実際のプラズマ実験条件における新古典輸送の計算と実験

観測結果との比較によるコードの検証、核融合炉の定常運転シナリオの立案、新古典粘性の評価とそれを用いたプラズマ回転分布の予測シミュレーションなどの研究を進めることを研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 上記の目的のために、研究代表者が開発してきた非軸対称磁場配位にも適用可能な、ドリフト運動論方程式を従来の計算法に比べ少ない近似で解く高精度な新古典輸送・径電場形成のモンテカルロコード"FORTEC-3D"を改良し、上に挙げたような様々な研究課題に取り組んだ。

(2) このシミュレーションコード自身の検証と、従来の計算法に含まれない有限な磁場ドリフトの項が、新古典輸送の評価にどのように(定性的)どの程度(定量的)影響を与えるかを調べるために、FORTEC-3Dと、従来の局所近似を使った新古典輸送計算法との中間的な近似を使った計算法を開発した。これによって磁場ドリフトの効果が新古典輸送計算に与える影響を明確に比較検証できるようになった。

(3) 様々なイオン種が混在するプラズマにおける新古典輸送を扱えるように、FORTEC-3Dのモンテカルロスキームに適合した新しい多イオン種用クーロン衝突項を開発した。クーロン衝突項が満たすべき保存則を数値計算の丸め誤差の範囲で満たす、非常に良好な性質を持つ衝突計算法を完成させた。

## 4. 研究成果

(1) 高精度な新古典輸送シミュレーション法の構築

新古典輸送現象のシミュレーションは、トーラス磁場中の荷電粒子のガイディングセンター軌道とクーロン衝突による散乱に従う、5次元位相空間におけるプラズマ分布関数の時間発展を記述するドリフト運動論方程式をいかに数値計算で解くかという問題である。FORTEC-3Dコードは分布関数のMaxwell分布からのずれ $\delta f = f - f_M$ に対するドリフト運動論方程式に、線形化衝突項をモンテカルロ法を基に導入して、2-weight  $\delta f$ 法と呼ばれる手法によって解く粒子コードである。従来の新古典輸送計算法との最大の差は、ガイディングセンター運動のうち、磁場の勾配、曲率ドリフト(以下磁場ドリフト項 $v_B$ と呼ぶ)という磁力線を横切るドリフト運動を従来の新古典輸送計算のように無視あるいは近似してしまわず、 $v_B \cdot \nabla \delta f$ の項を直接的に計算に含める点である。その効果は、プラズマがより高温低衝突になる核融合炉心プラズマにおいて重要となると予想される。磁場ドリフト項を取り入れた大域的な新古典輸送計算には従来の計算手法に比べ膨大な計算量が必要となる。そのため、FORTEC-3D

コードはその時点で利用可能なスーパーコンピュータで効率よく大規模並列計算が実行可能なように常にコードの改良・チューニングを行ってきた。

また、コーディング以外にも計算モデル自体の更新も行ってきた。その1つは、現在の主流であるシングル・ヌル配位（ダイバータがトラスの下側のみにつく配位）のトカマクに対応した計算ができるよう、磁場の上下非対称性に FORTEC-3D を対応させた点である。もう一つの改良点は、磁場ドリフト項を含んだ計算を長時間行う際に問題となる、摂動分布  $\delta f$  の増大を抑えるためのソース・シンク項を導入したことである。 $\delta f$  法は  $|\delta f/f_M| \ll 1$  のオーダリングが満たされていることが、その数値計算の妥当性の必要条件となっている。しかし、計算条件によっては定常解に収束する前に  $|\delta f/f_M|$  が増大してしまい、解を得られなくなるという事が起きていた。 $\delta f$  のうち磁気面平均 Maxwell 分布に比例する部分は新古典輸送には全く寄与しないことが分かっている。そこで、 $\delta f$  分布が作る密度及び圧力の摂動の磁気面平均値をゼロに近い値に収束させるアダプティブなソース・シンク項を開発し、FORTEC-3D に導入した。これによって、今まで定常解を得ることが難しかったケースでも安定的に解を得られるようになった。

## (2) 有限な磁場ドリフト項の新古典輸送計算への影響の研究

磁場ドリフト項を取り入れた FORTEC-3D のヘリカル配位における新古典輸送計算が、具体的にどのような機構で従来の計算法との結果の差を生むのかについてはよくわかっていなかった。そのため、近似が最も少ない大域的 FORTEC-3D コードから、磁場ドリフトの項を落とす近似や ExB 回転の非圧縮近似など、他の新古典輸送計算法が使っている近似を段階的に入れていくと、どのように計算結果が変わるかを検証できるよう、局所近似版 FORTEC-3D コードの開発を進めた。

従来、磁場ドリフト項は大域的 FORTEC-3D のように全て取り入れるか、あるいは完全に無視するか、のどちらかでないと計算が行えないと考えられてきた。これは、例えば磁場ドリフト項から磁気面に垂直な成分の項のみを落とす局所近似計算を行うと、そのような局所近似軌道はハミルトニアンで記述できないため、位相空間の保体積性 (Liouville の定理) が満たされなくなり、解の妥当性が疑わしくなるためである。 $v_B \cdot \nabla \delta f$  の項を磁気面接線成分も含め完全に落とすとこの問題を回避できるため、従来の新古典輸送計算ではこの近似がよく用いられてきた。しかし、ヘリカル磁場配位においては、径電場による ExB ドリフト  $v_E$  が  $v_B$  と同程度になる場合、そのポロイダル成分  $(v_E + v_B) \cdot \nabla \theta$  がゼロになるポロイダル共鳴付近で新古典輸送が増大することが知られている。従来の計算法では

有限な  $v_B$  の効果が入っていないため、 $v_E = 0$  で非物理的な新古典輸送の大きなピークが現れていた。有限な  $v_B$  を残してポロイダル共鳴の効果を見るために、我々は 2-weight  $\delta f$  法に [1] に示された原理に基づく改良を行うことで位相空間の保体積性の破れの問題を解決し、磁気面接線成分の磁場ドリフト項を残した新古典輸送計算が行える計算法を構築した。

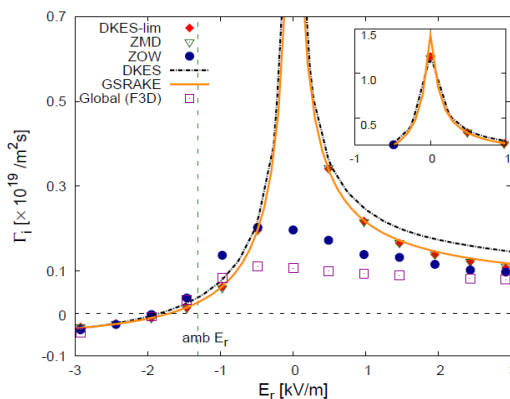


図1：様々な新古典コードによる新古典粒子束の径電場依存性の比較。、及び が大域的及び径方向の磁場ドリフトのみを落とした FORTEC-3D の結果であり、他の印は磁場ドリフトを完全に落とした FORTEC-3D の計算結果。実線は磁場ドリフトを完全に落とす近似を用いた他の計算コードの結果。

図1はLHD磁場配位における様々な新古典輸送計算コードによる計算例である。この図から、特に径電場  $E_r = 0$  付近で磁気面に垂直な成分のみを落とした近似は元の大域的シミュレーションと近い結果を示しているが、完全に  $v_B$  項を落とした FORTEC-3D の計算結果は、同じ近似を使った他の計算と同様に発散している。この事から大域的 FORTEC-3D とそれ以外の計算法の計算結果の差が、主に磁場ドリフトの接線成分による、 $E_r = 0$  付近でのポロイダル共鳴の変化によるものであるということが明確に示された。

## (3) 新古典輸送計算法のコード間・装置間相互検証

磁場ドリフト項を入れた FORTEC-3D 計算はこれまでの新古典輸送計算と異なる結果を示すことが分かった。この差が、実際の実験パラメータを入れた計算においてプラズマの粒子・熱輸送の評価や両極性径電場分布の推定にどの程度影響を与え、それが観測結果とどの程度一致するのかという検証研究も本研究課題の一環として進めてきた。

ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置はその設計思想に応じた多様性に富んだ閉じ込め磁場を持つ。そこで本研究では、[2]において行われた、LHD, W7-AS, TJ-11 という3つの全く異なるヘリカル装置における、従来の局所

近似新古典輸送計算と実験観測値との比較について、FORTEC-3D の計算も行って比較を行った。

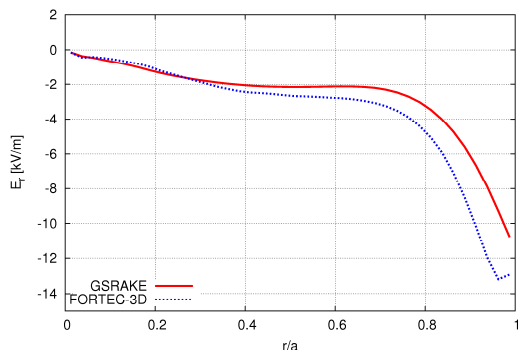


図 2: 両極性電場

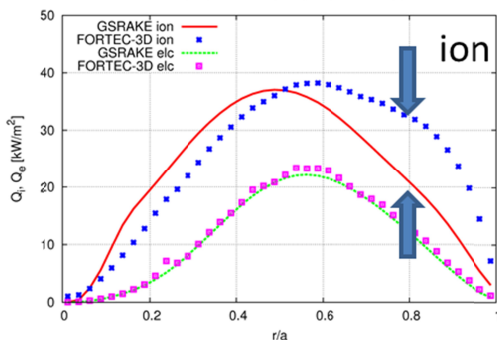


図 3: 新古典エネルギーフラックス

図 2, 3 は LHD 配位で、FORTEC-3D コードと局所近似の新古典コードによる両極性径電場とイオン、電子エネルギーフラックスを比較したものである。径電場は計算法による差は少ないが、イオンのエネルギーフラックスの評価には大きな差が生じることが分かる。実験における加熱分布や温度時間変化の計測を基にした熱輸送解析の結果と比較すると、新古典輸送はエネルギーフラックス全体の数十%を担っているが、その新古典エネルギーフラックスの評価自体に従来の計算法と 2 倍程度の差が出るということは、無視しえない差である。W7-AS や TJ-II においても同様の傾向が見られた。

#### (4) 新古典粘性の評価及び実験解析への応用

FORTEC-3D コードは新古典粒子・エネルギーフラックスだけでなく、新古典トロイダル、ポロイダル粘性も数値的に評価できるように開発が進められた。この計算の応用の一つとして、トカマクにおける微小な非軸対称磁場摂動が生み出す新古典トロイダル粘性 (NTV) の評価と、それがプラズマ回転分布に与えるが挙げられる。

研究代表者は [3] において、径電場がない場合の NTV の計算を他の解析的な計算法と比較検証した。本研究では、さらにその基本的な性質を知るために、径電場が大きい場合の NTV について調べた。図 4 はトカマクに  $m/n=7/3$  の摂動磁場 ( $r=0.48a$  が安全係数

$q = 7/3$  の共鳴有理面に相当) を与えた際の、NTV の強度分布が径電場でどう変化するかを示したものである。従来の解析的近似解では、共鳴有理面近傍にピークした NTV 分布が現れ、径電場の増大とともに下がると予測されるが、FORTEC-3D で径電場を大きくすると、共鳴面上の NTV が減少する代わりにその両側にダブルピークを持った分布になることが発見された。そしてこのダブルピーク構造が、解析解で無視されている非捕捉粒子軌道の磁力線方向運動と径電場による ExB ドリフト、そして磁場摂動とのカップリングによって生じ、そのピークの幅が磁気シアと径電場の関数で書けることを示した。こうして、これまでの計算法で無視されてきた非捕捉粒子も NTV に大きく寄与することを世界で初めて証明した。

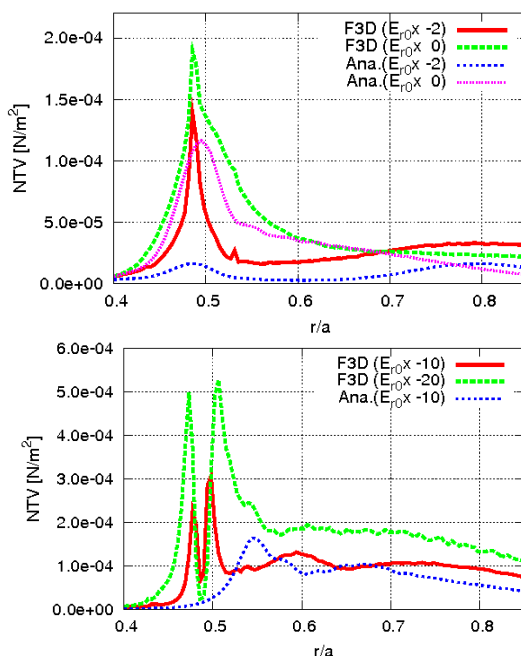


図 4: 新古典トロイダル粘性の径方向分布。上が径電場が弱い場合、下、径電場が強い場合。F3D が FORTEC-3D の計算結果、Ana が捕捉粒子のみを考慮する解析解。

また、FORTEC-3D による NTV の計算は、実際のトカマク実験の回転分布のシミュレーション予測に応用された。原研機構の本多氏らとの共同研究で、JT-60U トカマク装置の誤差磁場によるトロイダル粘性を FORTEC-3D で計算し、それを原研機構の統合輸送コード TOPIC のモーメントバランスの計算に粘性項として入れることで、NTV を無視した以前の計算に比べてより実験観測結果に近いトロイダル回転分布を再現することに成功した (図 5)。

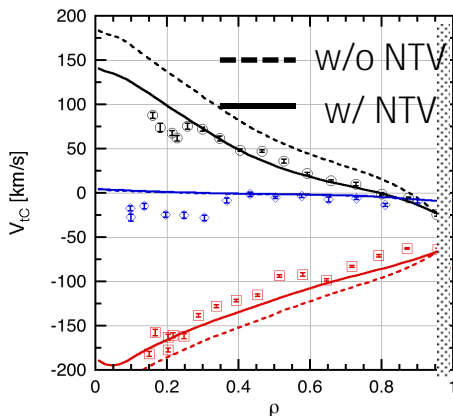


図5: JT-60Uにおける異なる3つの運転条件におけるトロイダル回転の計測結果(点)と、TOPICコードによる回転分布のシミュレーション予測の比較。実線がFORTEC-3Dで求めた誤差磁場によるNTVを入れた計算、点線がNTVを無視した結果。

#### (5)核融合炉設計への新古典輸送計算の応用

現在核融合研ではLHD相似型の次期ヘリカル核融合実証炉FFHRの概念設計が進められている。LHDのようなヘリオトロン型のヘリカル装置で核融合炉を設計する際の問題点として、高化を狙うと磁気軸が外側に動くShafranov Shiftによって、荷電粒子の閉じ込め性能が悪化するという点が挙げられる。そのため、垂直磁場を印可して磁気軸のシフトを抑え、高化でもバルクのDTプラズマの新古典輸送や高速粒子の損失が核融合炉の定常運転が可能なレベルに抑制しなければならない。FORTEC-3DコードをFFHRのいくつかの設計条件における新古典輸送の評価に応用して、新古典輸送熱輸送を定量的に評価した。図6のように、垂直磁場を掛けると新古典輸送がよく抑えられ、この熱輸送レベルはちょうど粒子による自己加熱から放射損失を引いたレベルと釣り合う程度になり、乱流輸送を考えない理想的な条件では定常運転が可能な条件を満たしたと言える。

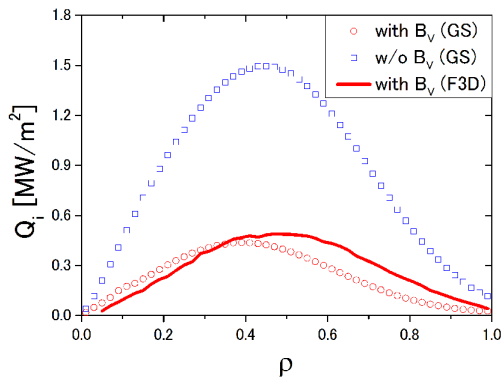


図6: FFHRにおける新古典エネルギーフラックスの計算例。実線がFORTEC-3Dコード、点が局所近似コードの結果。局所近似コードでは磁気軸シフトを抑制するための垂直磁場あり、無しの計算を行った。

今後、さらに新古典輸送と高化によるMHD不安定性の両方を考慮したFFHRの概念設計を進め、安定性と閉じ込め性能を両立させたより良いヘリカル炉の設計に新古典輸送シミュレーションを生かしていく予定である。

#### (6)多イオン種プラズマ用クーロン衝突項の開発

FORTEC-3Dコードは元々、1種類の粒子種のみを扱うように開発され、これを多イオン種プラズマに対応させるために、線形化Fokker-Planck衝突項を多粒子種間の衝突が扱えるように拡張した。その際、衝突項が持つべき重要な性質は[4]に述べられているように、粒子数、モーメント、エネルギーの保存則と、衝突オペレータの随伴性である。本研究課題では、[4]で示された、上記の性質を保持する線形化衝突項を、2-weight  $\delta f$ 法におけるモンテカルロ衝突項として実装する方法を考案した。図7にDTプラズマにおける計算例を示す。初期に与えたMaxwell分布からの温度の摂動 $dT/T$ が衝突によって緩和し、理論から予測される通り $dT_D/T_D = dT_T/T_T$ に収束した。また、同じ衝突項をプラゾフ流体コードに実装したものとの比較でもよい一致を示した。この衝突オペレータは今後、FORTEC-3Dコードに組み込まれて多粒子種プラズマの新古典輸送研究に役立つ予定である。

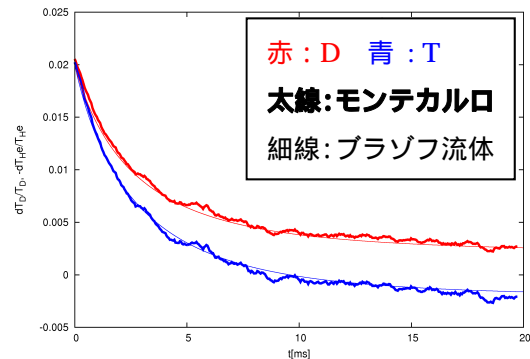


図7: クーロン衝突による温度緩和のシミュレーション結果。モンテカルロ法による実装と、プラゾフ流体コードに実装したものを比較。

#### 参考文献

- [1] X. Q. Xu and M. N. Rosenbluth, Physics of Fluids B Vol. 3, 627 (1991).
- [2] A. Dinklage et al. Nuclear Fusion Vol. 53, 063022 (2013)
- [3] S. Satake, J.K. Park, et al., Phys. Rev. Lett. Vol. 107, 055001 (2011).
- [4] Sugama et al., Phys. Plasmas Vol. 16, 112503 (2009).

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)

M. Honda, S. Satake 他(12名、2番目), Integrated modelling of toroidal rotation with the 3D non-local drift-kinetic code and boundary models for JT-60U analyses and predictive simulations, Nuclear Fusion, 査読有、印刷中 (2015)

M. Honda, S. Satake 他(9名、2番目), Experimental analyses and predictive simulations of toroidal rotation driven by the neoclassical toroidal viscosity in rippled tokamaks, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 54, 114005 (2014)

doi:10.1088/0029-5515/54/11/114005

S. Satake 他(13名、1番目, Benchmark of local and non-local neoclassical transport calculations in helical configurations, Proc. 41st EPS conf., 査読無,

04.130, (2014) <http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/04.130.pdf>

J. Miyazawa, Y. Suzuki, S. Satake 他(15名、3番目), Physics analyses on the core plasma properties in the helical fusion DEMO reactor FFHR-d1, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 54, 043010 (2014)

doi:10.1088/0029-5515/54/4/043010

S. Satake 他(4名、1番目), Simulation studies of the effect of  $E \times B$  rotation on neoclassical toroidal viscosity in tokamaks with small magnetic perturbations, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 53, 113033 (2013)

doi:10.1088/0029-5515/53/11/113033

S. MATSUOKA, S. SATAKE 他(4名、1番目(9名、2番目), Formation of electron-root radial electric field and its effect on thermal transport in LHD high Te plasma, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.8, 1403039 (2013)

DOI: 10.1585/pfr.8.1403039

[学会発表](計7件)

佐竹 真介, 「f-PICコードによる多イオン種新古典輸送シミュレーションに向けたクーロン衝突項の開発」、日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月24日、早稲田大学(東京都)

S. SATAKE, "Benchmark of local and non-local neoclassical transport calculations in helical

configurations", 41th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2014年6月27日, Berlin, Germany

S. SATAKE, "Adaptive source and sink terms in delta-f neoclassical transport simulation for steady-state solution", 23rd International Toki Conference, 2013年11月21日, 岐阜県土岐市

S. SATAKE, "Simulation Study on Neoclassical Poloidal Viscosity in Helical Plasmas", 54th APS-DPP meeting (招待講演), 2012年11月2日, Providence, RI, USA

S. SATAKE, "Neoclassical heat transport analysis in helical DEMO reactor concept FFHR-d1", 22nd International Toki Conference, 2012年11月22日, 岐阜県土岐市

S. SATAKE, "Neoclassical Toroidal Viscosity Calculations in Tokamaks using a f Monte Carlo Simulation and Their Verifications", 53rd APS division of plasma physics meeting, 2011年11月16日, Salt Lake City, UT, USA

S. SATAKE, "Drift-kinetic Simulation Studies on Neoclassical Toroidal Viscosity in Tokamaks with Small Magnetic Perturbations", The 24th IAEA Fusion Energy Conference, 2012年10月13日, San Diego, CA, USA

[図書](計1件)

内藤裕志, 佐竹真介, プラズマ・核融合学会誌 Vol.89-04、「核融合プラズマシミュレーションの技法 5章:粒子シミュレーションのコーディング技法」(2013) p.245-260

[その他]

ホームページ等

<http://nsrp.nifs.ac.jp/activity/activity04.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐竹 真介 (SATAKE, Shinsuke)

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: 70390630