

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21560861

研究課題名(和文) ジャイロ流体モデルの拡張と検証

研究課題名(英文) Extension and validation of gyro-fluid model

研究代表者

洲鎌 英雄 (Sugama, Hideo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：80202125

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：トーラス形状の磁場に閉じ込められたプラズマの粒子や熱の輸送現象を正確に取り扱うためには、粒子集団と電磁場の振る舞いを記述するジャイロ運動論に基づくシミュレーションを行う必要がある。本研究では、ジャイロ運動論と同程度に正確で、より短時間の計算が可能なジャイロ流体モデルが開発され、その有効性の検証およびプラズマ乱流解析への応用が進められた。

研究成果の概要(英文)：In order to accurately investigate transport phenomena of particles and heat in plasmas confined in toroidal magnetic fields, one needs to use the gyrokinetic model which describes behaviors of collective motions of particles and electromagnetic fields. In this study, the gyro-fluid model, which can evaluate plasma transport much more quickly than the gyrokinetic model, is developed and its efficiency is confirmed by comparison to the gyrokinetic model and application to analyses of plasma turbulent flow processes.

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：ジャイロ流体モデル プラズマ運動論 ゾーナルフロー 乱流輸送

## 1. 研究開始当初の背景

制御熱核融合の実現を目指す上で、プラズマ輸送の定量的予測は最重要課題の一つである。核融合プラズマは非常に高温で無衝突に近く、プラズマ粒子の軌道は複雑な平衡配位や電磁場の影響を受けるため、プラズマ輸送問題を解くには粒子速度分布を考慮した厳密な運動論的取り扱いが必要となる。近年、異常輸送を引き起こすドリフト周波数帯のプラズマ乱流を正確に記述することができるジャイロ運動論と呼ばれる第一原理に基づくプラズマ乱流輸送・ゾーナルフローの理論・シミュレーション研究が、コンピュータ性能の急速な向上と相俟って、米国、欧州および日本で盛んに行われるようになった。5次元位相空間上の粒子分布関数を直接数値的に求めるジャイロ運動論的乱流シミュレーションは、プラズマ異常輸送の高精度の予測を行うための非常に有力な手段となるが、一方でジャイロ運動論的乱流シミュレーションは膨大な計算容量・計算時間を必要とし、現在あるいは近い将来のスーパーコンピュータの能力をもってしても、扱う時間領域の範囲を飛躍的に拡大することや異常輸送モデリングのため多様なプラズマ条件下で計算するパラメータサーベイを行うことは容易ではないということも事実である。このような問題点を補うには、数値計算スキームの改良だけでなく、より小さな計算容量・計算時間でジャイロ運動論的シミュレーションと同等の精度でプラズマ異常輸送、ゾーナルフロー飽和レベルを予測することができるようなシミュレーションの基礎となるジャイロ流体モデルを構築することが必要である。過去、Hammett & Perkins (Phys.Rev.Lett.1990) によるジャイロ流体モデル等が提案されているが、トロイダル温度勾配(ITG)乱流等のジャイロ運動論的プラズマシミュレーションによって得られた乱流輸送やゾーナルフロー飽和レベルを定量的に正確に再現するジャイロ流体モデルは未だ構築されていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、トカマク・ヘリカル系トロイダルプラズマにおけるジャイロ運動論的乱流輸送・ゾーナルフローの理論・シミュレーション解析により、ジャイロ運動論シミュレーションに比して少ない計算時間・計算容量かつ同精度で、乱流輸送係数やゾーナルフロー飽和レベルを求め得るジャイロ流体シミュレーションモデルを構築・拡張・検証し、それをプラズマ乱流・ゾーナルフローの解析に応用することである。

## 3. 研究の方法

本研究では、乱流輸送・ゾーナルフロー飽

和レベルに対するジャイロ運動論による予測を正確に再現できるジャイロ流体モデルを構築するため、ジャイロ運動論モデルとの比較・検証を行う。また、乱流輸送・ゾーナルフローに対する衝突周波数・磁場配位の効果・平衡電場や不安定モード構造の効果を正確に取り扱うため、ジャイロ運動論・流体モデルに基づく理論解析・シミュレーションを実行するとともに、理論の定式化やモデルの拡張も並行して進めていく。

測地的音響モード(GAM)振動やRosenbluth-Hinton 残留フロー等に関する運動論的ゾーナルフローの特性を記述できる運動論的流体クロージャーモデルを用いた流体シミュレーションを行い、ゾーナルフローの無衝突時間発展に対する非円形断面等のトカマク磁場配位の効果を調べ、ジャイロ運動論に基づく予測結果と比較することにより、流体モデルの妥当性を検証する。

ジャイロ運動論モデルやジャイロ流体シミュレーションを用いて、イオン温度勾配(ITG)モード、捕捉電子モード(TEM)や電子温度勾配(ETG)モードに対するゾーナルフローの生成効率の違いを明らかにする。

ジャイロ運動論シミュレーションコードに適用できる高精度の衝突モデルを構築する。また、トカマクゾーナルフローの無衝突時間発展を記述する運動論的流体クロージャーモデルを衝突の効果が取り入れられるように拡張する。

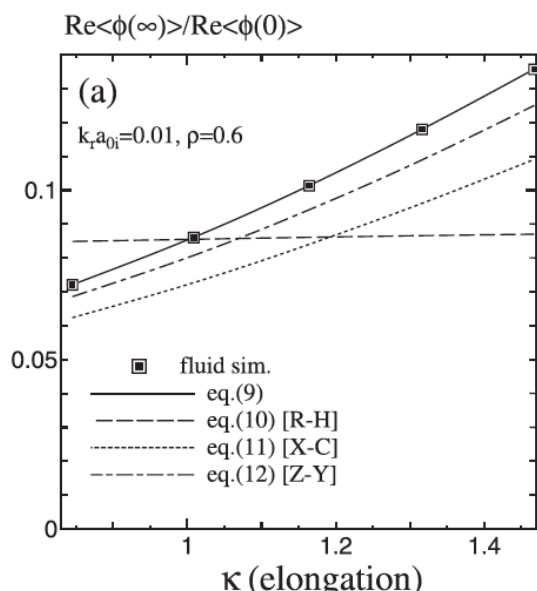
ドリフト運動論・ジャイロ運動論に基づく理論解析やシミュレーションに基づき、平衡磁場の非軸対称・ヘリカル成分や巨視的な平衡電場が、フローや輸送に与える影響を体系的に調べる。また、変分原理に基づいた運動論的方程式の定式化を行い、粒子・エネルギー・運動量の輸送方程式の精度を検証する。

## 4. 研究成果

### 運動論的流体クロージャーモデルによるゾーナルフロー・ITG・TEM・ETGモードに関する研究成果

測地的音響モード(GAM)振動やRosenbluth-Hinton 残留フロー等に関する運動論的ゾーナルフローの特性を記述できる運動論的流体クロージャーモデルを用いて、ゾーナルフローの無衝突時間発展に対する非円形断面等のトカマク磁場配位の効果を線形ジャイロ流体シミュレーションにより調べた。ゾーナルフローの無衝突時間発展のシミュレーションを行い、残留ゾーナルフローに対するトロイダル磁場配位の非円形断面の効果や磁力線方向の初期フローの効果を調べ、クロージャーモデルがジャイロ運動論による予測結果を再現することを検証した(次ページの図参照)。また、微視的不安定性の線形固有関数を用いた非線形ソース項を用いたシミュレーシ

ンにより、イオン温度勾配(ITG)モード、捕捉電子モード(TEM)や電子温度勾配(ETG)モードに対するゾーナルフローの生成効率の違いを示した。このクロージャーモデルを取り入れて、トロイダルITGモードによる乱流輸送フラックスを計算するためのジャイロ流体シミュレーションコードの開発を進めた。ジャイロ流体コードによるITGモードの線形時間発展シミュレーションを実行し、線形ITGモードの周波数・成長率のポロイダル波数依存性や固有関数の空間分布構造を求め、それらを線形ジャイロ運動論的シミュレーションの結果と比較することにより、妥当な結果が得られることが示された。



図：残留ゾーナルフロー振幅のトカマク楕円度に対する依存性：クロージャーモデルを取り入れた流体シミュレーション結果が運動論の結果（実線）を再現することが確かめられた[参考文献：O. Yamagishi and H. Sugama, Phys. Plasmas, Vol.19 (2012) 092504]。

#### 衝突モデルに関する研究成果

多種イオンからなるプラズマに対する新しい線形モデル衝突演算子を構築した。新たなモデル衝突線形演算子は、異種イオンが異なる温度を持つ場合に対しても、粒子・運動量・エネルギー保存を満たし、共役関係やポルツマンのH定理を満足する。この衝突線形演算子をジャイロ運動論的方程式に導入できる形に変形し、衝突性ジャイロ運動論的方程式とマクスウェル方程式に基づいて、乱流揺動に伴うエントロピー、電磁揺動エネルギー、粒子・熱の乱流輸送や衝突散逸の間に成立するジャイロ運動論的エントロピーバランス方程式を導いた。このモデル衝突線形演算子は、ジャイロ運動論的シミュレーションに適用することも可能である。また、新たにゾーナルフローに対する衝突の効果を取り入れたクロージャーモデルの導出を行った。

#### フロー・粘性に対する磁場配位・電場の効果に関する研究成果

無衝突過程での残留ゾーナルフローレベルは、乱流輸送の抑制に大きく寄与するため、ゾーナルフローの振る舞いを正確に記述するジャイロ流体モデルを構築するためにも、ゾーナルフローが平衡磁場配位の幾何学的形状や平衡電場の大きさからどのような影響を受けるかをジャイロ運動論により精密に評価しておく必要がある。ヘリカル系磁場配位や平衡電場に対するゾーナルフローの依存性を明らかにするため、ジャイロ運動論に基づく理論解析およびシミュレーションを行い、平衡電場の増加に伴うヘリカルリップル捕捉粒子の径方向変位の減少によって、理論予測通りに、残留ゾーナルフローが増加することが確認された。

ヘリカル系プラズマ(LHD)における標準配位およびプラズマ内寄せ配位に対するITG乱流のジャイロ運動論的シミュレーションから得られた乱流揺動のデータに対して、エントロピー・スペクトル解析を行った。内寄せ配位においてより顕著なゾーナルフローによる乱流輸送の抑制が、高い小半径方向波数への揺動エントロピー・スペクトルの移送により生じることを明らかにした。

準対称性を有するトロイダル磁場配位において、高速フローが存在するための条件を吟味し、その結果、磁気面を横切る電流がないという標準的な条件の下では、イオン音速程度の高速フローが存在するためには、Boozer 座標における計量テンソル成分が全て対称性を有することが必要となり、結論として、トカマクのような軸対称配位でなければならぬことが示された。また、トカマク配位において、非軸対称摂動磁場が印加された場合に生じるトロイダル方向の新古典粘性を  $f$  モンテカルロ・シミュレーションにより計算することに成功し、解析的予測との比較を行うことにより、シミュレーション結果の有効性を確認した。

軸対称・非軸対称トロイダルプラズマにおける粒子・熱・運動量の古典及び乱流輸送を記述する基礎方程式に基づき、トロイダル磁場配位の有する対称性・非対称性が、運動量輸送や両極性粒子拡散等の径方向電場の決定に関わる物理機構に対して、どのように影響するかを系統的に示した。一般の非軸対称配位では、ジャイロ半径オーダリングの2次オーダーでの両極性粒子拡散条件から、平衡電場が決定されるが、上下対称性を持つトカマク配位やステラレーター対称性を持つ準対称ヘリカル配位では、2次オーダーまで、自動的に両極性拡散条件が成立し、平衡電場を決定するには、3次オーダーの運動量バランス方程式を解く必要があることを明らかにした。

## ジャイロ運動論の定式化に関する研究成果

ジャイロ流体モデルはジャイロ運動論を基礎とするが、そのジャイロ運動論の基礎となるブラゾフ・ポアソン・アンペール方程式系が持つエネルギー・運動量保存則を、作用積分にネーターの定理を用いることにより導出し、光速の電磁波を含むブラゾフ・マクスウェル方程式系におけるエネルギー・運動量保存則との差を明らかにした。さらに、ジャイロ中心の分布関数、乱流電磁場、および輸送時間スケールでゆっくりと時間変化する背景磁場の支配方程式系全体を変分原理から導くように拡張されたジャイロ運動論的場の理論に基づき、軸対称な背景磁場により閉じ込められたプラズマの乱流状態における粒子・エネルギー・運動量の保存則が導かれた。さらに、導かれた粒子・粒子・エネルギー・運動量保存則のアンサンブル平均を取って得られる方程式系が、WKB 近似を用いて得られる従来の粒子・エネルギー・運動量の輸送方程式系と、ジャイロ半径パラメータ展開におけるリーディングオーダーにおいて一致することが確かめられた。

### 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 15 件)

- 1) H.Sugama, T.-H.Watanabe, and M. Nunami, "Extended gyrokinetic field theory for time-dependent magnetic confinement fields", *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol.21 (2014) pp.012515-1-15.
- 2) S.Satake, J.-K.Park, H.Sugama, and R. Kanno, "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 (2013) pp.113033-1-10.
- 3) M.Nunami, T.-H.Watanabe, and H.Sugama, "A reduced model for ion temperature gradient turbulent transport in helical plasmas", *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol.20 (2013) pp.092307-1-6.
- 4) H.Sugama, T.-H.Watanabe, and M. Nunami, "Conservation of energy and momentum in nonrelativistic plasmas", *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol.20 (2013) pp.024503-1-4.
- 5) T.-H.Watanabe, H.Sugama, M.Nunami, K. Tanaka, and M.Nakata, "Gyrokinetic simulations of entropy transfer in high ion temperature LHD plasmas", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 査読有, Vol.55 (2013) pp.014017-1-6.
- 6) T.-H.Watanabe, H.Sugama, M.Nunami, and M.Nakata, "Gyrokinetic simulation studies for non-axisymmetric plasma confinement: turbulent transport and entropy transfer", *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, Vol.399 (2012) pp.012020-1-10.
- 7) O.Yamagishi and H.Sugama, "Collisionless kinetic-fluid simulation of zonal flows in non-circular tokamaks", *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol.19 (2012) pp.092504-1-10.
- 8) H.Sugama, T.-H.Watanabe, M.Nunami, S.Satake, S.Matsuoka, and K.Tanaka, "Kinetic Simulations of Neoclassical and Anomalous Transport Processes in Helical Systems", *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol.7 (2012) pp.2403094-1-9.
- 9) T.-H.Watanabe, H.Sugama, and M. Nunami, "Effects of equilibrium-scale radial electric fields on zonal flows and turbulence in helical configurations", *Nuclear Fusion*, 査読有, Vol.51 (2011) pp.123003-1-10.
- 10) H.Sugama, T.-H.Watanabe, M.Nunami, and S.Nishimura, "Quasisymmetric toroidal plasmas with large mean flows", *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol.18 (2011) pp.082505-1-11.
- 11) S.Satake, J.-K.Park, H.Sugama, and R.Kanno, "Neoclassical Toroidal Viscosity Calculations in Tokamaks Using a  $\delta f$  Monte Carlo Simulation and Their Verifications", *Progress in Physical Review Letters*, 査読有, Vol.107 (2011) pp.055001-1-4.
- 12) S.Satake, H.Sugama, R.Kanno, and J.-K. Park, "Calculation of neoclassical toroidal viscosity in tokamaks with broken toroidal symmetry", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 査読有, Vol.53 (2011) pp.054018-1-21.
- 13) H.Sugama, T.-H.Watanabe, M.Nunami, and S.Nishimura, "Momentum balance

and radial electric fields in axisymmetric and nonaxisymmetric toroidal plasmas”, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, Vol.53 (2011) pp.024004-1-17.

- 14) H.Sugama and T.-H.Watanabe, “Enhancement of Residual Zonal Flows in Helical Systems with Equilibrium Radial Electric Fields”, Contributions to Plasma Physics, 査読有, Vol.50 (2010) pp.571-575.
- 15) H.Sugama, T.-H.Watanabe, and M.Nunami, “Linearized model collision operators for multiple ion species plasmas and gyrokinetic entropy balance equations”, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.16 (2009) pp.112503-1-16.

〔学会発表〕(計 22 件)

- 1) 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 沼波政倫, 「ジャイロ運動論による粒子・エネルギー・運動量の保存則の導出」, 日本物理学会第 69 会年次大会 (2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学湘南キャンパス) 29pAX-6.
- 2) 山岸統, 洲鎌英雄, 「流体モデルによるトカマクの ITG 乱流シミュレーション」, 日本物理学会第 69 会年次大会 (2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学湘南キャンパス) 28pAX-11.
- 3) H.Sugama, T.-H.Watanabe, and M. Nunami, “Multiscale Modeling of Transport Processes in Helical Systems with ExB Flows”, Joint 19th ISHW and 16th IEA-RFP Workshop (16-20 September 2013, Padova, Italy), I2.
- 4) H.Sugama, “Transport Processes and Entropy Balance in Toroidal Plasmas”, Turbulence, Transport and Structures in Magnetized Plasmas (3-6 June 2013, Mediterranean Institute of Advanced Study, Marseille, France).
- 5) 山岸統, 洲鎌英雄, 「運動論的クロージャモデルに基づくトカマクにおける流体シミュレーション」, 日本物理学会第 68 会年次大会 (2013 年 3 月 26 日, 広島大学東広島キャンパス) 26aEC-10.
- 6) 渡邊智彦, 洲鎌英雄, 沼波政倫, 「ヘリカル系での巨視的径電場によるゾーナルフロー増幅と乱流輸送低減」, 日本物理学会第 68 会年次大会 (2013 年 3 月 26

日, 広島大学東広島キャンパス) 26pEC-3.

- 7) 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 沼波政倫, 「非常磁場に対するジャイロ運動論」, プラズマ・核融合学会, 第 29 回年会 (2012 年 11 月 30 日, クローバープラザ, 福岡県春日市) 30E07P.
- 8) H.Sugama, O.Yamagishi, T.-H.Watanabe, and W.Horton, “Kinetic-fluid model for zonal flows”, US-Japan Joint Institute for Fusion Theory (JIFT) Workshop on ‘Neoclassical and Turbulent Flow Generation and Associated Transport’ (25-26 November 2012, Obaku Plaza, Kyoto University, Uji, Kyoto).
- 9) H.Sugama, T.-H.Watanabe, and M. Nunami, “Gyrokinetic Field Theory for Time-Dependent Equilibrium Magnetic Fields”, 22nd International Toki Conference, Cross-Validation of Experiment and Modeling for Fusion and Astrophysical Plasmas (19-22 November 2012, Toki, Japan), P2-3.
- 10) 山岸統, 洲鎌英雄, 「運動論的流体クロージャモデルによる数値シミュレーション」, 日本物理学会, 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 18 日, 横浜国立大学常盤台キャンパス) 18aFA-11.
- 11) 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 沼波政倫, 西村伸, 「トロイダルプラズマの対称性とフロー」, 日本物理学会, 第 67 回年次大会 (2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス) 27aYG-8.
- 12) 洲鎌英雄, 山岸統, 「ゾーナルフローに対する衝突性運動論的流体クロージャモデル」, Plasma Conference 2011, プラズマ・核融合学会第 28 回年会, 応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会, 日本物理学会 (領域 2) 2011 年秋季大会 (2011 年 11 月 23 日, 石川県立音楽堂, 金沢市) 23P143-B.
- 13) 山岸統, 洲鎌英雄, 「無衝突運動論的クロージャ流体モデルに基づく、非円形断面トカマクにおけるゾーナル流減衰シミュレーション」, Plasma Conference 2011, プラズマ・核融合学会第 28 回年会, 応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会, 日本物理学会 (領域 2) 2011 年秋季大会 (2011 年 11 月 23 日, 石川県立音楽堂, 金沢市) 23P141-B.
- 14) 佐竹真介, 洲鎌英雄, 菅野龍太郎, J.-K.

Park, 「delta-f法を用いたトカマクにおける新古典トロイダル粘性計算法の検証」, Plasma Conference 2011, プラズマ・核融合学会第28回年会, 応用物理学会第29回プラズマプロセッシング研究会, 日本物理学会(領域2)2011年秋季大会(2011年11月23日, 石川県立音楽堂, 金沢市) 23P049-P.

- 15) H.Sugama, T.-H.Watanabe, M. Nunami, and S.Nishimura, “Quasisymmetric toroidal plasmas with large mean flows”, US-Japan Joint Institute for Fusion Theory (JIFT) Workshop on ‘Neoclassical Flow Generation and Associated Transport Dynamics’ (9-10 September 2011, Long Branch, NJ, USA).
- 16) H.Sugama and O.Yamagishi, “Simulation of Zonal Flows Based on a Collisionless Kinetic-Fluid Closure Model”, 22nd International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (7-9 September 2011, Long Branch, NJ, USA) Poster Session 1-38.
- 17) H.Sugama, T.-H.Watanabe, M. Nunami, and S.Nishimura, “Momentum balance and radial electric fields in axisymmetric and nonaxisymmetric systems”, 20th International Toki Conference (ITC20) The Next Twenty Years in Plasma and Fusion Science (7-10 December 2010, Toki, Japan), P1-28.
- 18) 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 沼波政倫, 「トロイダルプラズマの運動量輸送と両極性拡散」, 日本物理学会, 2010年秋季大会(2010年9月24日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス) 24aQJ-7.
- 19) 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 沼波政倫, 「線形衝突演算子とジャイロ運動論的エントロピーバランス」, プラズマ・核融合学会, 第26回年会(2009年12月4日, 京都市国際交流会館) 4pE-09P.
- 20) 渡邊智彦, 洲鎌英雄, 沼波政倫, 「ヘリカル系における巨視的径電場によるゾーナルフロー増大」, プラズマ・核融合学会, 第26回年会(2009年12月1日, 京都市国際交流会館) 1aC-03.
- 21) H.Sugama, T.-H.Watanabe, and M. Nunami, “Linearized Model Collision Operators for Multiple Ion Species

Plasmas”, The 51th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of The American Physical Society (2-6 November 2009, Atlanta, Georgia) BP8.20. in Bulletin of The American Physical Society, Vol.54, No.15 (2009).

- 22) H.Sugama, “Enhancement of Residual Zonal Flows in Helical Systems with Radial Electric Fields”, 17th International Stellarator/ Heliotron Workshop 2009 (12-16 October 2009, Princeton, New Jersey), C-04.

〔図書〕(計1件)

- 1) 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 解説 “ジャイロ運動論による磁化プラズマ乱流の研究-核融合から宇宙まで-”, 日本物理学会誌, BUTSURI Vol.68, No.5 (2013), pp.296-304.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ

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

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
洲鎌 英雄 (SUGAMA, Hideo)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号: 80202125
- (2) 研究分担者  
渡邊 智彦 (WATANABE, Tomohiko)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 30260053
- (3) 研究分担者  
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
- (4) 研究分担者  
山岸 統 (YAMAGISHI, Osamu)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号: 20413990