

令和元年6月13日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18336

研究課題名(和文)トカマクプラズマにおけるRF波動とシースの連成シミュレーション

研究課題名(英文) Numerical simulation of radio-frequency wave-sheath interactions in tokamak plasmas

研究代表者

河野 晴彦 (Kohno, Haruhiko)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：70710846

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：トカマク型核融合炉において高周波(RF)波動加熱を適用する場合、導体表面に生じるRFシースが原因となり、プラズマ中への不純物の混入や壁材損壊の問題が生じることがあるため、本研究ではこのRFシースの予測精度をより高める手法の開発に従事した。具体的には、シース内の全電流密度とマイクロスケールの計算により求められたシースインピーダンスを組み合わせることで一般化シース境界条件を構築し、それをプラズマ波とシースの巨視的相互作用を計算する有限要素スキームに取り入れた。本研究で開発した計算コード(rfSOL)は、イオンリッチシースの条件の下で、任意の磁場強度かつ幅広い周波数帯において適用可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した計算コードを用いることにより、トカマク型核融合炉において代表的な波動加熱(イオンサイクロトロン加熱、低域混成加熱、電子サイクロトロン加熱)を適用することで導体壁に生じるRFシース内の電圧およびシース表面の電力密度を精度良く計算することが可能となった。本研究では、シース内の電場を静電ポテンシャルで表し、シース内の電子に対してMaxwell-Boltzmann近似を施している。この仮定が成り立つのであれば、核融合以外の分野で問題となるシースに対しても、本計算スキームを適用することができる。

研究成果の概要(英文)：When applying radio-frequency (RF) waves to heat fusion plasmas in tokamaks, it has been known that several deleterious interactions causing impurity production and material damage can occur due to the formation of RF sheaths on conducting surfaces. The objective of this research was to develop a new numerical scheme which increases the capability for evaluating various quantities relating to RF sheaths. This has been accomplished by introducing the sheath boundary condition described using a complex sheath impedance parameter and the total current density in the sheath into the finite element scheme, which enables macroscopic calculations of the sheath-plasma interactions. The developed numerical code rfSOL can be applied to problems under various magnetic field strengths and a wide range of frequencies only if the assumption that ion-rich sheaths are formed on the surfaces holds true.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：シース プラズマ波 高周波加熱 トカマク型 磁場核融合 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

RF (radio-frequency) プラズマと導体壁面との相互作用により生じる RF シースの制御は、高周波波動加熱を採用する核融合炉において重要な課題である。RF シースの平均電圧は、プラズマ波が存在しない場合に生じる Bohm シースの電圧と比較して数十倍に達することがある。重要な点は、この増幅されたシース内で質量が大きい正イオンが加速されて壁面と衝突することにより、スパッタリングによるプラズマ中への不純物の混入や壁材損壊の問題が生じることである。

RF シースの存在は 20 世紀半ばに実験で発見され、核融合の分野においては 1980 年代後半からその理論的研究が進められた。国際協力によって現在建築が進められている国際熱核融合実験炉 (ITER) では、複数の波動加熱法が適用されるため RF シースの制御が重要な問題の一つになると考えられている。特に、イオンサイクロトロン加熱ではトカマク内部にアンテナを配置することになるが、アンテナを流れる電流の方向が磁力線と垂直ではない場合、磁力線に沿った低速波がアンテナ近傍の構造物に到達する際に高いシース電圧を発生させることが予想される。

このような背景から、RF シースとプラズマ波の相互作用を正しく計算するスキームを開発し、RF シースによる損害を定量的に評価することは、核融合分野における重要な研究課題の一つであるといえる。

2. 研究の目的

本研究では任意の高周波加熱に対応すべく、磁場強度および導体壁と磁力線の接触角がイオンリッチシースを保つ範囲で任意であり、かつ幅広い周波数帯において適用可能な、シース・プラズマ相互作用計算のためのスキームを構築することを目指す。重要な点は、非中性 Debye シースに加えて、比較的弱い磁場で磁力線が壁面に対して斜めに接する場合に生じるマグネティックプレシースを物理モデルに組み込むことである。このことは、シース内の変位電流に加えて、シース内に存在するイオン・電子の運動により生じる電流も考慮することを意味する。このように一般化されたシースモデルを用いて、広範囲のプラズマパラメータに対応するシース電圧、および従来は計算することができなかったシース内の電力散逸を計算する手法を確立する。

3. 研究の方法

従来の計算 (従来の rfSOL コード) で適用したシース境界条件では、Debye シース内を真空と仮定し、それにより RF シースをコンデンサとしてモデル化した (図 1 左参照)。この仮定は、磁力線が導体壁に対して斜めに交差する場合においても、強磁場・高周波数帯においては精度の良い近似を与える。しかし、任意の磁場強度および周波数帯に適用しうるスキームを構築するためには、シース内におけるイオン・電子の運動による電流を考慮しなければならない。シース内の電流は、弱磁場および磁力線が導体壁に斜めに交差する場合においてマグネティックプレシースを形成させ、またシース内において電力散逸を生じさせる。本研究では、シース内の変位電流と併せて荷電粒子の運動による電流を考慮し、それらの電流の和を導体壁とシース先端の間の RF シース電圧と関連づけることにより、シースを複素インピーダンスとしてモデル化する (図 1 右参照)。

シース表面上の局所的な値として定義されるシースインピーダンスパラメータは、シース内部で成立するいくつかの方程式を広範囲のパラメータで計算することにより、複数のパラメータに依存する関数として与えられる。それを rfSOL コードによるマクロの計算で用いる一般化シース境界条件に含めることにより、本研究で目的とするシース・プラズマ連成解析を実現することができる。

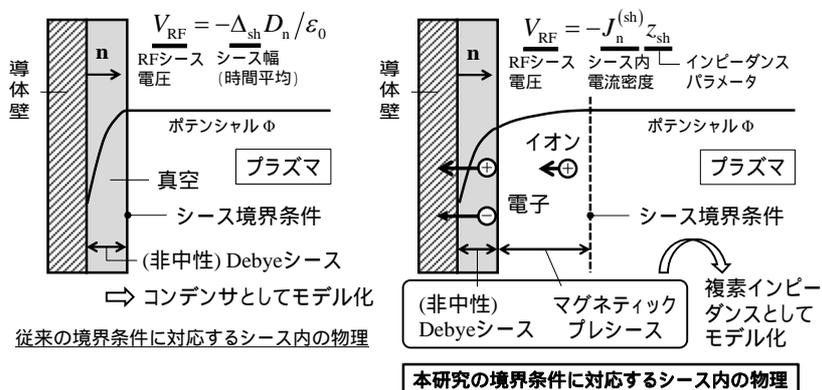


図 1 シース表面上に適用する境界条件が包含する物理現象の比較。

4. 研究成果

平成 28 年度の研究において，一般化シース境界条件をプラズマ内部に適用される Maxwell 方程式と連成させて解く非線形有限要素法解析コードを開発した(雑誌論文 参照). 最初のステップとして，一様なプラズマ密度の下で背景磁場に対応する磁力線が導体壁(シース表面)に対して垂直に交わる場合の解析を行った. シースインピーダンスパラメータは一般的には四つの変数に依存する関数であるが，上記のような特別な場合はそれを 2 変数関数として記述することが可能である. 重要な結果の一つとして，高密度のプラズマ中に配置されたアンテナの内部を流れる電流が小さい条件において，従来の容量性シースモデルを用いて得られるシースに沿う波動の共鳴現象が，(物理的により正確な)一般化シースモデルを用いた場合には生じないことが確かめられた(図 2 参照).

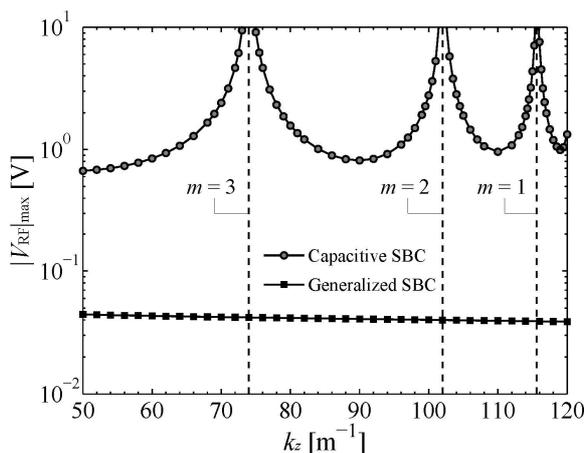


図 2 波数ベクトル成分 k_z に依存する RF シース電圧の最大値 $|V_{RF}|_{max}$ の比較. 凡例に示す「Capacitive SBC」と「Generalized SBC」は，それぞれ容量性シース境界条件および一般化シース境界条件を適用して得られた結果を意味する.(雑誌論文 Fig. 15 より引用)

平成 29 年度の研究では，研究協力者である J. R. Myra 博士が開発した新たなシースインピーダンスパラメータ(Myra, Phys. Plasmas **24**, 072507 (2017))を一般化シース境界条件に導入することにより，磁力線が壁面に対して斜めに交差する場合においても，イオンリッチシースの条件を満たす限り，本研究で開発した有限要素法解析コード(改良された rfSOL コード)を適用することが可能になった.

この新たに開発された計算コードを用いて，以前に容量性シース境界条件を用いて得られた結果(Kohno, et al., Phys. Plasmas **19**, 012508 (2012))との比較を行い，低シース電圧の下ではシース内で生じる散逸効果によりシース・プラズマ波が生じないことを明らかにした. この散逸効果は，主にシース内における電子の運動に起因するものである. 一般化シース境界条件を課した場合でも，低密度プラズマ，小さな(磁力線と壁面の)交差角，高シース電圧の下ではシース表面近傍にシース・プラズマ波が出現し，広い範囲でスパッタリングや壁面損壊が生じうることを示した(図 3 参照).

低速波が伝播するような低密度プラズマ中で高シース電圧(~ kV)を発生させる条件においては，一般化シース境界条件を用いて得られた結果(図 4(a), (b))と従来の容量性シース境界条件を用いて得られた結果(Kohno, et al., Phys. Plasmas **19**, 012508 (2012))の間に大きな違いは生じないことが確かめられた. 一方，従来の容量性シースモデルでは(シース内を真空と仮定しているために)シース内の電力散逸を正しく見積もることができなかったが，本研究で開発した計算コードを用いることにより，図 4(c)に示すようにシース表面上の局所的な電力密度を計算することが可能となった(この電力密度をシース表面上のある領域にわたって積分すると，その範囲に形成されているシース内の電力散逸量を計算することができる.)

RF シースの重要性は近年海外で強く認識されており，その例として，UCLA の Large Plasma Device (LAPD)，ゲント大学の Ion cyclotron Sheath Test ARrangement (IShTAR)，オークリッジ国立研究所の Prototype-Material Plasma Exposure eXperiment (Proto-MPEX)，ロレーヌ大学の ALINE で，RF シースの測定に特化した実験が行われている. 数値計算で用いられるシース境界条件は，シースとプラズマの相互作用をマクロなスケールで評価するための代表的な手法の一つであり，研究代表者の他にも，その導入を目指している研究グループは少なくない. しかし，現状は研究代表者が開発した rfSOL コードのみが同境界条件の下でシースとプラズマの相互作用を数学的に正しく解いており，一般化シース境界条件の導入によりその有用性がさらに高まることになった. この分野における国内の研究例はあまり見られないが，RF シースの問題が指摘されている実験の結果との比較が今後の課題である.

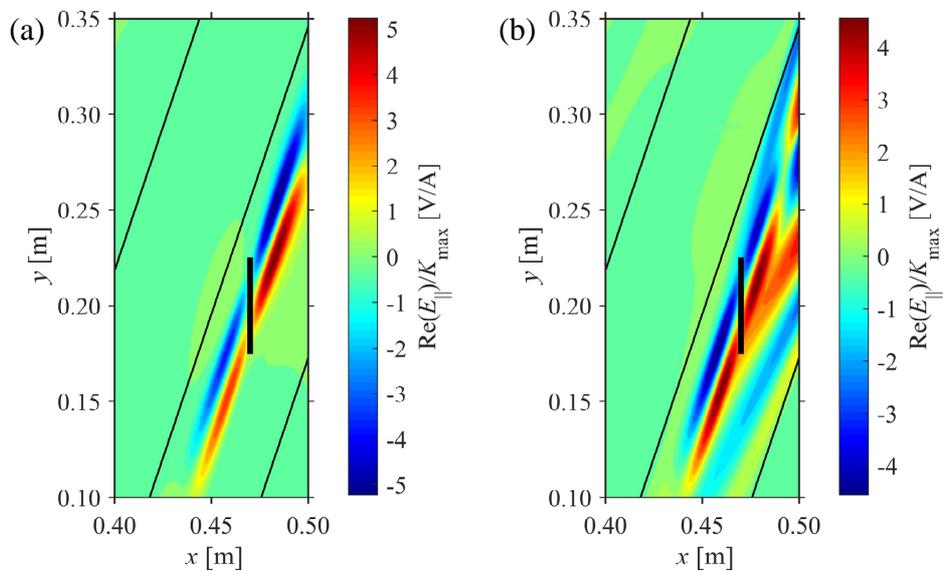


図3 アンテナ電流密度の最大値により正規化された電場成分 $E_{||}/K_{max}$ (実部) の分布の比較：(a) シース・プラズマ波が生じていない $K_{max} = 1$ A/m の場合 (シース電圧が低い場合) の結果，(b) シース・プラズマ波が生じている $K_{max} = 100$ A/m の場合 (シース電圧が高い場合) の結果．シースとプラズマの境界面は計算領域の右端 ($x = 0.5$ m) に位置する．プラズマの密度は低域混成共鳴に相当する密度よりもわずかに高い．(雑誌論文 Fig. 4 より引用)

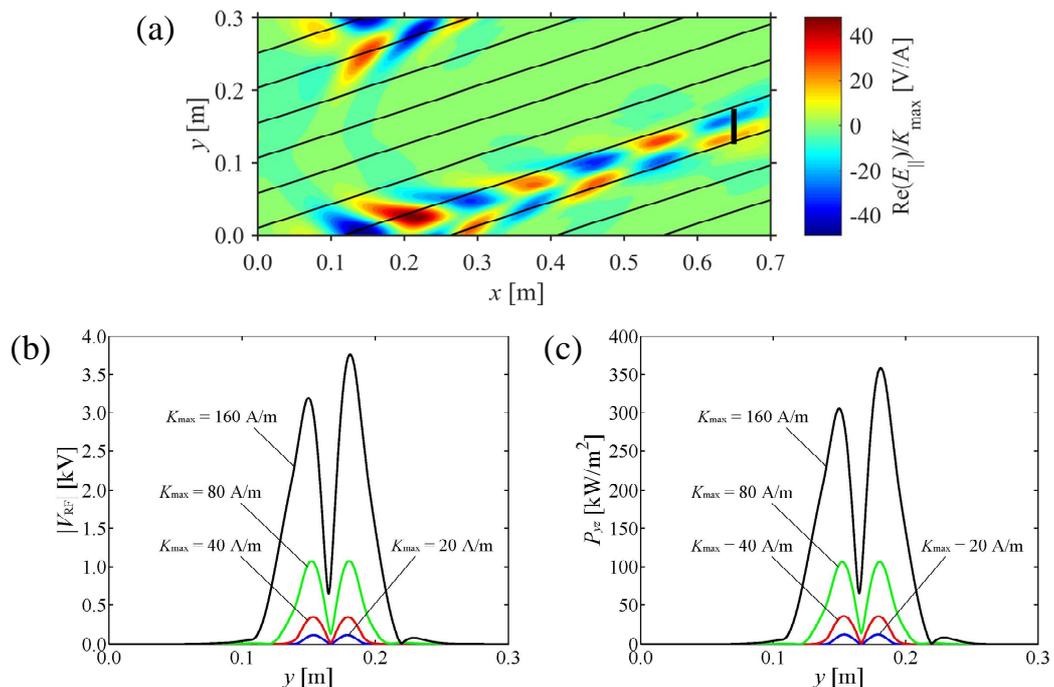


図4 低密度のプラズマ中を伝播する低速波とシースの相互作用により生じる物理量の分布：(a) アンテナ電流密度の最大値により正規化された電場成分 $E_{||}/K_{max}$ (実部) の分布，(b) 四つの異なるアンテナ電流密度の最大値を用いて得られたシース表面に沿う RF シース電圧 V_{RF} の大きさの分布，(c) 四つの異なるアンテナ電流密度の最大値を用いて得られたシース表面に沿う表面電力密度 P_{yz} の分布．シースとプラズマの境界面は計算領域の右端 ($x = 0.7$ m) に位置する．(雑誌論文 Fig. 7(b), Fig. 9(b), Fig. 9(c) より引用)

5 . 主な発表論文等 (研究代表者を下線で示す .)

[雑誌論文] (計 4 件)

H. Kohno and J. R. Myra, Radio-frequency wave interactions with a plasma sheath in oblique-angle magnetic fields using a sheath impedance model, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.26, 2019, pp.022507-(1-15).
DOI: 10.1063/1.5054920

H. Kohno and J. R. Myra, A finite element procedure for radio-frequency sheath-plasma interactions based on a sheath impedance model, Computer Physics Communications, 査読有, Vol.220, 2017, pp.129-142.
DOI: 10.1016/j.cpc.2017.06.025

James R. Myra and Haruhiko Kohno, A post-processing method to simulate the generalized RF sheath boundary condition, EPJ Web of Conferences, 査読有, Vol.157, 2017, pp.03037-(1-4).
DOI: 10.1051/epjconf/201715703037

H. Kohno, J. R. Myra, and D. A. D'Ippolito, Erratum: "Numerical investigation of fast-wave propagation and radio-frequency sheath interaction with a shaped tokamak wall" [Phys. Plasmas 22, 072504 (2015)], Physics of Plasmas, 査読有, Vol.23, 2016, pp.089901-(1-4).
DOI: 10.1063/1.4960384

[学会発表] (計 7 件)

J. R. Myra, J. C. Wright, S. Shiraiwa, and H. Kohno, Calculation of RF sheath properties from surface wave-fields: a post-processing method, 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 5-9, 2018, Portland, Oregon, U.S.A.

河野 晴彦, J. R. Myra, 一般化シースモデルを用いた RF シースの解析 (理論およびシミュレーション), 第 7 回 ICRF 加熱研究会, 核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市), 2017 年 12 月 19 日

H. Kohno and J. R. Myra, Numerical analysis of radio-frequency sheath-plasma interactions based on a sheath impedance model, US-Japan Workshop on RF Physics, September 6-8, 2017, Santa Monica, California, U.S.A.

J. R. Myra and H. Kohno, A post-processing method to simulate the generalized RF sheath boundary condition, 22nd Topical Conference on Radio-Frequency Power in Plasmas, May 30 - June 2, 2017, Aix-en-Provence, France.

河野 晴彦, J. R. Myra, 一般化シースモデルを用いた RF 波動とシースの連成シミュレーション, 第 6 回 ICRF 加熱研究会, 核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市), 2016 年 12 月 27 日

J. R. Myra and H. Kohno, An improved rf-sheath boundary condition and implications for ICRF modeling, 26th IAEA Fusion Energy Conference, October 17-22, 2016, Kyoto, Japan.

H. Kohno, J. R. Myra, and D. A. D'Ippolito, Numerical investigation of radio-frequency sheath-plasma interaction with a shaped tokamak wall, US-Japan Workshop on RF Heating Physics 2016, May 18-20, 2016, Toyama, Japan.

6 . 研究組織

研究協力者

研究協力者氏名 : ジェームズ・R. マイラ

ローマ字氏名 : James R. Myra

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。