

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03793

研究課題名(和文) 磁力線と壁面がなす任意の角度に適用可能なRFシースの計算手法の開発

研究課題名(英文) Development of a numerical method for analyzing radio-frequency sheaths in arbitrarily oriented magnetic fields

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)：高周波(RF)波動加熱を適用するトカマク型核融合炉の壁面に生じるRFシースの予測精度を高めるために、導体壁の隆起を考慮した2次元マイクロスケールRFシースモデルを開発し、有限要素法に基づく数値計算スキームを構築した。この計算コードを用いることにより、一様な背景磁場下において、無次元化された電子アドミタンスやイオンアドミタンスの値が、正弦曲線で与えられた壁面の形状に依存することなく、幅広い範囲の無次元化されたイオンサイクロトロン周波数および波動の周波数でほぼ一定となることが確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した2次元マイクロスケールRFシースモデルは、磁力線と壁面の接点が存在せず、かつ、電子に対してMaxwell-Boltzmann近似を適用することができる場合に、任意のイオンサイクロトロン周波数および波動の周波数におけるシース挙動の計算を可能にするものである。マクロスケールにおけるシースとプラズマ波の相互作用を計算する際に、シース幅の時間平均値とシース表面の曲率半径が同程度となるような領域が含まれる場合、従来のシース境界条件をそのような領域の境界に課することはできないが、本研究の成果はその制約が取り除かれるようにシース境界条件を改良するための指針を与えた。

研究成果の概要(英文)：To improve the predictive accuracy of the radio-frequency (RF) sheaths on the walls of tokamak fusion reactors using RF heating, a two-dimensional microscale RF sheath model with curved plates on both sides of a plasma-filled domain and a finite element scheme based on this model have been developed. Using this numerical code, it was confirmed that the dimensionless electron and ion admittances are nearly independent of the peak-to-peak amplitude of the sinusoidally curved walls over wide ranges of the dimensionless ion cyclotron frequency and RF frequency under a uniform background magnetic field.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：シース 高周波加熱 磁場核融合 有限要素法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

RF (radio frequency) プラズマが導体壁面に接することにより壁面上に生じる 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 シースの電圧の時間平均値は、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に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。国際協力によって建築が進められている 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。

RF シースとプラズマの非線形相互作用を評価する方法の一つとして、Myraらは「シース境界条件」を提案した (Myra et al., *Phys. Plasmas* **22**, 062507 (2015)). そして、研究代表者は、このシース境界条件を導入した有限要素解析コード「rfSOL」を開発し、核融合炉を想定したパラメータを用いて数値解析および理論解析を行った (Kohno et al., *Phys. Plasmas* **26**, 022507 (2019)). これまでの計算では、磁力線が壁面に対して斜めに交差する場合でも、イオンリッチシースが保たれる条件であれば、シース境界条件を正しく適用して RF シース内の電圧や電力散逸を評価することができた。しかし、磁力線と壁面のなす交差角が狭い範囲で急激に変化するような場合、その壁面に沿う境界上でシース境界条件を課すことは妥当性に欠けることになる。実際の核融合装置の壁面には短いスケールの凸凹が存在することを考慮すると、上記のような場合にもシース境界条件を正しく適用できるように同境界条件を改良することは、RF シースの予測精度を高めるための重要な研究課題であるといえる。

2. 研究の目的

シース幅の時間平均値とシース表面の曲率半径が同程度となる場合においても適用しうる 2次元マイクロスケール RF シースモデルを開発し、NERSC 等のコンピュータシステムで計算可能な大規模並列有限要素スキームを構築する。そして、三角関数で表した壁面形状の振幅の増加に伴い、電子密度、イオン密度、静電ポテンシャルの空間分布や、イオン・電子アドミタンスがどのように変化するかを調査し、得られた知見をシース境界条件の改良につなげることを目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に本研究で用いた解析モデルを示す。二つの湾曲した極板間にプラズマが満たされ、一様な背景磁場が印加される場合を考える。極板は反対称的に振動する電圧源に接続されているとし、その凸凹波形の幅  $h$  を任意に変えることができるとする。粒子源は解析領域の中央 ( $x = L_x/2$ ) に配置され、正イオンおよび電子が両端の極板に向かって運動し、その結果としてシースが形成されるものとする。

本研究で適用する基礎方程式は、静電ポテンシャルに関する Poisson 方程式、正イオンに対する連続の式と運動方程式、電子に対する Maxwell-Boltzmann 関係式である。さらに、解析領域をいくつかの小領域に分け、各々の小領域において積分形の電流の連続方程式を適用する。なお、すべての物理量は無次元化されている。これらの方程式に、時間に関しては Crank-Nicolson 法、空間に関しては 4 節点四角形要素を用いる有限要素法による離散化を施し、Newton-Raphson 法による反復計算を経て数値解を求める。行列方程式を伴う大規模計算を実現するために、米国の国立エネルギー研究科学計算センター (NERSC) のコンピュータシステムを利用した。

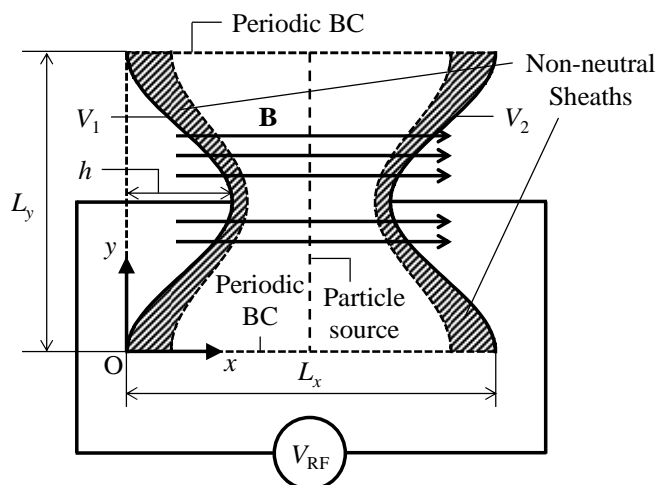


図 1 2次元マイクロスケール RF シースモデルの解析領域および境界条件。

#### 4. 研究成果

ここでは、代表的な二つの結果を示す。

まず、図2はy方向の周期長  $L_y$  を40、壁面の凸凹波形の幅  $h$  を20、無次元化された波動の周波数  $\Omega$  を0.3、振動する電圧源の頂点間振幅  $V_{pp}$  を20とし、さらに、無次元化されたイオンサイクロトロン周波数  $\Omega_i$  の異なる二つの値を0.1, 10として求められた周期的に変化するシースの、同時刻における電子密度、静電ポテンシャル、イオン速度の分布を比較したものである。本研究では電子が磁力線に沿って運動することを仮定しているが、 $\Omega_i = 10 \gg 1$  では正イオンも同様に磁力線に沿って運動することが確かめられる(図2(b)参照)。一方、 $\Omega_i = 0.1 \ll 1$  では、マグネティックプレース内において正イオンは磁力線に沿って運動するが、非中性シース内においては壁面に対してほぼ垂直な方向に運動することがわかる(図2(a)参照)。これらのことは、正イオンに対する運動方程式によって説明することができる。すなわち、 $\Omega_i$  の極限において運動方程式は  $u \times b = 0$  ( $u$  はイオン速度、 $b$  は背景磁場に沿う単位ベクトル) のように簡略化され、正イオンは背景磁場に沿って運動することがわかる。また、 $\Omega_i \rightarrow 0$  の極限において、正イオンは電場による力のみを受けることになる。

次に、異なる二つの  $\Omega_i$  の値を用いて得られた、無次元化された電子アドミタンス  $Y_e$  の実部とイオンアドミタンス  $Y_i$  の絶対値の壁面凸凹幅依存性を図3に示す。図3(a)から、 $\text{Re}(Y_e)$  の値は  $\Omega_i$  の値や壁面の形状に依存することなく一定であることが確かめられる。このことは、壁面への垂線と磁力線がなす角度を  $\theta$  とすると、局所的に定義される電子アドミタンスパラメータ  $y_e$  が  $|\cos \theta|$  に比例することに関係している ( $Y_e$  は  $y_e$  を壁面に沿って積分することにより求められる)。また、図3(b)から、イオンサイクロトロン周波数が高く、 $\Omega = 0.3$  のように波動の周波数が低い場合は、 $|Y_i|$  も壁面の形状に依存せず、ほぼ一定値となることがわかる。これは、図2(b)に示すように、 $\Omega_i \gg 1$  においてイオンが電子と同様に磁力線に沿って運動することに関係している。ただし、イオン速度は静電ポテンシャルの2次元的な分布に依存し、さらに、 $\Omega$  の減少とともにイオンアドミタンスパラメータ  $y_i$  も減少するため、 $\text{Re}(Y_e)$  ほど明確に  $|Y_i|$  が一定となることを確認することはできない。

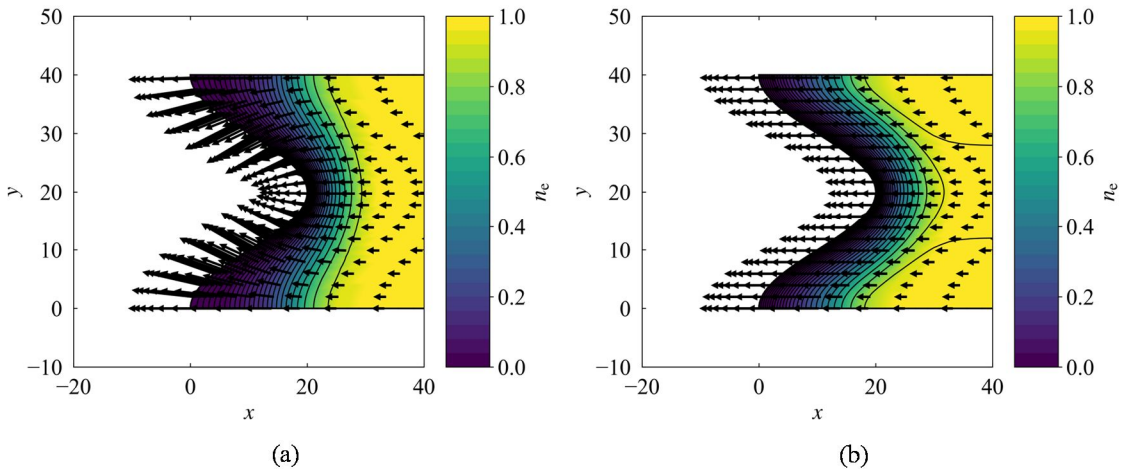


図2 同時刻におけるシース内の電子密度(カラーコンター)、静電ポテンシャル(等高線)、およびイオン速度(矢印)の比較:(a)  $\Omega_i = 0.1$  の結果、(b)  $\Omega_i = 10$  の結果。いずれも、 $L_x = 200$ 、 $L_y = 40$ 、 $h = 20$ 、 $\Omega = 0.3$ 、 $V_{pp} = 20$  の下で計算を行った。

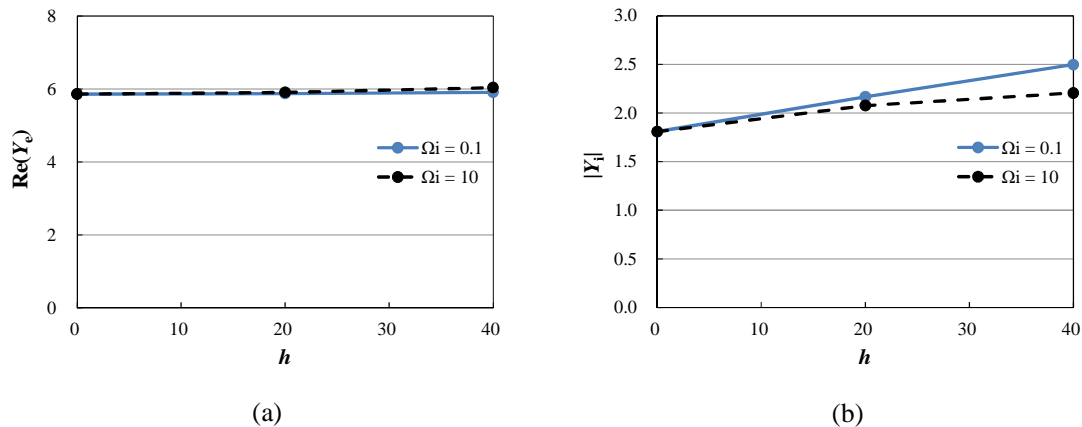


図3 異なる二つの  $\Omega_i$  の値における壁面凸凹幅依存性:(a)  $\text{Re}(Y_e)$  の依存性、(b)  $|Y_i|$  の依存性。いずれの  $\Omega_i$  の値においても、 $L_y = 40$ 、 $\Omega = 0.3$ 、 $V_{pp} = 20$  の下で計算を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Myra J. R., Kohno H.	4. 巻 26
2. 論文標題 Radio frequency wave interactions with a plasma sheath: The role of wave and plasma sheath impedances	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 052503-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5088343	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Myra J R, Kohno H	4. 巻 61
2. 論文標題 Calculation of RF sheath properties from surface wave-fields: a post-processing method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 095003-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab2f41	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 J. R. Myra, H. Kohno
2. 発表標題 Investigation of a two-dimensional microscale RF sheath model
3. 学会等名 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. C. Wright, C. Migliore, J. R. Myra, D. Curreli, D. N. Smithe, T. G. Jenkins, M. L. Stowell, D. L. Green, C. J. Beers, T. Younkin, S. Shiraiwa, N. Bertelli, M. J. Poulos, H. Kohno
2. 発表標題 Development of a non-linear rf sheath benchmark suite
3. 学会等名 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Kohno, J. R. Myra
2. 発表標題 Numerical analysis of the time-dependent radio-frequency sheath behavior using a two-dimensional microscale model
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	マイラ ジェームス  (Myra James R.)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Lodestar Research Corporation		