

非一様円柱プラズマ中のヘリコン波の分散関係

諫山 翔伍 [1]; 羽田 亨 [1]; 谷川 隆夫 [2]; 篠原 俊二郎 [3]
[1] 九大総理工; [2] 東海大・総科研; [3] 東京農工大・工

Dispersion properties of helicon waves in a non-uniform cylindrical plasma

Shogo Isayama[1]; Tohru Hada[1]; Takao Tanikawa[2]; Shunjiro Shinohara[3]
[1] ESST, Kyushu Univ; [2] RIST, Tokai Univ.; [3] Inst. Eng, TUAT

Electric thrusters, characterized with high specific impulse, are considered to be useful for long-term space missions such as those to outer planets. On the other hand, the performance of many of the conventional electric thrusters (e.g., ion engines) is limited by electrode wastage. In order to overcome this difficulty, we have initiated the HEAT (Helicon Electrode less Advanced Thruster) project [1], in order to pursue research and development of completely electrode less thrusters.

Stable generation of high density and low temperature plasma using helicon wave (bounded whistler wave in a cylindrical geometry) is experimentally established [2]. The density of the generated helicon plasma is as high as $10^{-19}[\text{m}^3]$, so that its application to the electric thrusters can be considered. On the other hand, it is not clear even today how the plasma is generated by the helicon wave. Therefore, it is an important problem to clarify the plasma generation mechanism from a physical point of view. In the past, electron acceleration and Landau damping by the helicon wave were thought to play an essential role, but later they were found to be insufficient to explain the observed highly efficient plasma production. Recently, Shamrai et al [3] proposed a model based on the linear mode conversion, i.e., the helicon wave is mode converted to a large wave number TG mode as they propagate in a density gradient, and the electric field of the TG mode strongly accelerates the electrons, leading to the highly efficient production of the helicon plasma.

In the presentation, we describe the dispersion relation of the helicon wave in homogeneous, cylindrical plasma. The magnetic field is assumed to be axial and constant strength. The density profile is defined as $n(r)=n_{up}\exp[-r^2/L]+n_b$. Since only the electrons can follow the high frequency wave field, the helicon dispersion relation can be obtained essentially by electron equation of motion together with Maxwell's equations. Considering the boundary condition, we use shooting method for solving differential equations. Furthermore, Considering collision frequency ν_{yu} , in order to investigate about the energy exchange of the helicon wave and TG wave, and plasma through a collision. In all the cases, the solutions contains four mode, a helicon wave and the TG wave of progressive and reflective wave. In addition, consider about the generation process of the helicon plasma in a microscopic particle movement theory by using the PIC code.

惑星探査などの長期ミッションにおいては比推力の高い電気推進機関が有効であり注目されている。これは推進剤としてプラズマを用い、これを加速することにより推進力を得る方法である。一方、イオンエンジン等、既存の多くの電気推進機関は有電極型のため、プラズマとの接触による電極摩耗による寿命の制限が大きな問題となっている。この現状を踏まえ、我々はプラズマ生成、プラズマ加速の両段階ともに無電極である、完全無電極型の新しい電気推進機関の開発研究を始動した(HEATプロジェクト)[1]。

無電極プラズマ生成はヘリコン波を用いることにより、安定に高密度・低温度プラズマが得られることが実験的にほぼ確立している[2]。ヘリコン波のプラズマ密度は $10^{-19}[\text{m}^3]$ 程度であり、電気推進機関への応用が期待できる。しかしながら、ヘリコン波によるプラズマの生成機構は未だ解明されておらず、現在まで様々な研究が行われてきた。したがって、ヘリコン波によるプラズマ生成機構を解明する事は重要な課題となっている。ここで、現在までのヘリコン波研究についての概要を述べる。まず、ヘリコン波の減衰過程は、粒子運動論と流体メカニズムの二つの取り扱いが考えられる。初期の頃は、電子加速に着目し、ヘリコン波による衝突減衰とランダウ減衰が考えられてきたが、高効率のプラズマ生成を説明するには不十分であり、長年にわたって問題となっていた。近年になり、Shamraiによって、高効率のヘリコン波プラズマ生成機構にはTGモードからヘリコンモードへの変換で生じる静電波が寄与している、という流体的なモード変換理論が提案された[3]。

本講では流体メカニズムにおけるヘリコン波の分散関係について述べる。今、背景磁場が $B_z = B_0z$ の、円柱内に閉じ込められた密度非一様のプラズマを考える。ここで、プラズマ密度プロファイルは、実際の実験条件を考慮し、円柱中心付近で密度が高くなるよう関数 $n(r)=n_{up}\exp[-r^2/L]+n_b$ として与えた。ヘリコン波の周波数 ω は電子とイオンのサイクロトロン周波数の間の領域にあるため、電子のみが高周波電場に追従して $E \times B_0$ ドリフトして電流が発生する。ヘリコン波の分散関係は、電場・磁場の摂動項を $B, E = E(r)\exp i(mb+kz-wt), B(r)\exp i(mb+kz-wt)$ として電磁場の方程式を解くと求めることができる。ここでは境界条件を考慮し、電磁場の方程式を密度 $n(r)$ の境界値問題として取り扱い、シューティング法を用いて解いた。さらに衝突周波数 ν_{yu} を考慮し、衝突を介したヘリコン波・TG波とプラズマとのエネルギー交換について調べた。なお、すべての場合においてヘリコン波・TG波をそれぞれ進行波・反射波にモード分解し、合計4つの解について調べた。加えて現在調査中である、微視的な粒子運動論におけるヘリコン波プラズマの生成過程についても、PICコードを使用し、考察する。