

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^{13}cm^{-3} , so that its application to the electric thrusters can be seriously 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 first describe the dispersion relation of the helicon wave in a homogeneous, cylindrical plasma. The magnetic field is assumed to be axial and constant strength. 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. The solutions can be written using the Bessel functions. In actual experiments, however, the plasma density is never uniform. Instead, it is often a function of the radial distance from the center, and in these inhomogeneous geometries one can expect the coupling between the helicon and the TG waves be significant. We show details of the dispersion properties in a cylindrical non-uniform plasma, obtained by numerically solving the boundary value problem.

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においてプラズマと非接触の電極を用いる、無電極型の新しい電気推進機関の開発研究を行っている (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^{13}cm^{-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解明の重要な課題である。ヘリコン波からプラズマへのエネルギー輸送、つまりヘリコン波の減衰過程は、これまで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てきた。初期は、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る。近年になり、Shamrai 等によって、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]。

本発表ではまず、円柱内におけるヘリコン波の分散関係について述べる。背景磁場が $B_z = B_0 z$ の円柱内に閉じ込められた一様密度のプラズマを考える。ヘリコン波の周波数 ω は $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$ の関係にあるため、電子のみが高周波電場に追随して $E \cdot B_0$ 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ことにより求めることができる。一方、現実のヘリコンプラズマは、外部コイルによる磁場構造などによる影響を受け、非一様な密度分布 (中心部で高密度) を持つ。このプラズマ密度の非一様性は、ヘリコン波から TG 波へのモード変換を導く際に重要であり、したがってヘリコン生成をモデル化するために不可欠な要素である。密度が一様な場合、電場・磁場は r のベッセル関数として求めることができたが、密度の不均一を考慮した場合は、電磁場の方程式をベッセル方程式に帰着させることができないため、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方程式を解く必要がある。発表では、分散関係の詳細、モード変換、これによるヘリコン生成等について述べる。