

非一様円柱プラズマ中のヘリコン波の分散関係 Dispersion relation of helicon waves in a non-uniform cylindrical plasma

諫山 翔伍^{1*}, 羽田 亨¹, 谷川 隆夫², 篠原 俊二郎³

ISAYAMA, Shogo^{1*}, HADA, Tohru¹, TANIKAWA, Takao², Shunjiro Shinohara³

¹九州大学総合理工学府, ²東海大学 総合科学技術研究所, ³東京農工大学 大学院 工学研究院

¹Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, ²Research Institute of Science and Technology Tokai University,

³Tokyo University of Agriculture and Technology

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行っている(HEATプロジェクト)[1]。

無電極推進機関は、プラズマ生成とプラズマ加速に分けて考えることができるが、このいずれもが科学的にも工学的にもチャレンジングな問題である。特に、プラズマ生成に関しては、「ヘリコン波」というプラズマ波動をガス内に伝播させることにより効率よくプラズマを生成する技術がほぼ確立している。その一方、なぜヘリコン波がプラズマを生成するのか、という最も基本的な問題については、未解決の課題が多い。これはプラズマ生成過程が、波動の電磁場による電子加速、加速電子による中性粒子の電離、中性粒子を多く含むプラズマ中のヘリコン波伝播、さらにはプラズマ励起による分散関係の時間発展等、多くの複雑な物理過程を含み、これらが互いに影響しあう複合過程だからである。

ヘリコンプラズマ生成過程を理解するための第一段階として、プラズマ中にヘリコン波が伝播する際にどのような電場ができ、それがどのような電子加速を引き起こすか、を理解するために、本研究では非一様密度円柱プラズマ中のヘリコン波の分散関係を正確に求め、非一様プラズマ中での波動の分布を明らかにする。

ヘリコン波は非一様プラズマ中を伝播する際、短波長のTG波といわれる散逸的静電波動を励起することが知られている。Shamrai等は、このTG波が電子を効率よく加速し、プラズマ生成の主役となっていると主張した[2]。プラズマ密度に非一様性に起因し、ヘリコン波・TG波それぞれの伝搬性・非伝搬性に基いて異なるプラズマ密度領域を定義できる[図1]。まず、基本的なヘリコン波・TG波の伝搬特性を調べるために、WKB的にそれぞれの密度領域で密度一定とした場合のヘリコン波・TG波の解について調べた。しかしこの方法には、密度変化に対してヘリコン波の波長の長さは十分に長い場合、それぞれの点で密度一定とした近似は妥当ではない。密度変化がある場合、径方向に関してフーリエ変換できない、の問題点がある。

そこで、密度非一様円柱プラズマ内の波動伝播を、印加周波数を固有値とする境界値問題としてとらえ、シューティング法により、波動(ヘリコン波・TG波)の周波数と固有関数を求めた。さらに衝突周波数を考慮し、衝突を介したヘリコン波・TG波と電子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。数値計算の詳細について報告する。

キーワード: 電気推進機関, 無電極推進, ヘリコンプラズマ, ヘリコン波, TG波, 分散関係

Keywords: Electric thrusters, The electrodeless thrusters, Helicon plasma, Helicon wave, TG wave, Dispersion relation

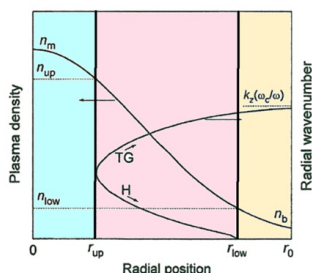


図1 密度変化とヘリコン波・TG波の解

- ・領域a ($n > n_{up}$): ヘリコン波、TG波共に非伝搬。
- ・領域b ($n_{low} < n < n_{up}$): ヘリコン波、TG波共に伝搬可。
- ・領域c ($n < n_{low}$): TG波は伝搬可、ヘリコン波は非伝搬。