

数値解析によるレーザー核融合ロケットの磁気スラストチャンバにおけるプラズマデタッチメントの検証

児島, 富彦

<https://hdl.handle.net/2324/4784667>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

論文提出者：児島 富彦

論文名：数値解析によるレーザー核融合ロケットの磁気スラストチャンバにおけるプラズマデタッチメントの検証

論文の要約

Thesis Summary

世界人口の爆発や地上のエネルギー枯渇問題の解決策として、地球以外の惑星に降り立ち、人類が居住できる環境を整えて生活する案がある。米国 National Aeronautics Space Administration (NASA) では、2030 年代に火星有人探査を行う計画が立てられており、その前段階として月面有人着陸を行うアルテミス計画が進められている。火星の地表や大気環境の調査は無人機により進みつつあるが、有人探査ミッションを行うための輸送手段には多くの課題がある。現在の化学推進ロケットや電気推進ロケットの利用では、地球から火星まで長距離航行の移動に往復 500 日以上という長い時間を要する。そのため、宇宙飛行士には宇宙線被曝や長時間の閉鎖空間滞在による精神的負担、無重力空間で過ごすことによる骨密度の減少といった負担が生じる。これらの課題の解決するためには、大推力を生み出しつつ、推進剤排気速度が速い新たな推進システムが必要となる。その候補の一つにレーザー核融合ロケットがある。レーザー核融合ロケットはレーザーで核融合反応を起こし、得られる莫大なエネルギーで推進剤をプラズマ化し、その高エネルギープラズマを超電導コイルで生成した磁場で排出して加速度を得るロケットである。レーザー核融合ロケットの推進機構は磁気スラストチャンバと呼ばれ、プラズマと磁場の相互作用を利用した推進原理が研究されている。先行研究では、磁気スラストチャンバにおいて高温プラズマの内部エネルギーを一方向の運動エネルギーへ変換する原理について理論計算や数値計算、さらにプラズマエネルギーをスケールダウンし、レーザー生成プラズマを用いた磁気スラストチャンバの模擬実験が行われ、多くの知見が得られてきた。しかしながらその過程で、将来の課題として手つかずになっている課題の一つに磁力線からのプラズマ離脱（デタッチメント）がある。磁気スラストチャンバにおける磁力線は機体の周りを一周しているため、排出されたプラズマが磁力線に捕らわれて一周回ってしまうと推力が発生しない。数値解析では磁気スラストチャンバによるプラズマ中のイオンの運動方向変換が確認されているが、デタッチメントの確認は未だ行われていない。模擬実験では磁気スラストチャンバが力積を受けることが確認されたため、デタッチメントが少なくとも生じていると考えられるが、検証はされていない。さらに、電子デタッチメントについては検討されておらず、イオンのみがデタッチメントした場合、空間分布の差から静電場が生じ、イオンが引き戻される、もしくは減速され、推力が減少する可能性がある。プラズマデタッチメントは他の磁場を利用するプラズマ推進機においても重要課題となっている。先行研究では、磁場変化のスケール長に対してイオンラーマ半径が急激に大きくなることで磁力線を周回できなくなり、磁気モーメントの保存が破れてイオンはデタッチすると言われている。そこで、磁気スラストチャンバにおいても磁気モーメントの保存が破れることによるデタッチメントを想定する。本研究目的は磁気スラストチャンバにおけるプラズマデタッチメントの検証とし、特に電子デタッチメントの判

断とメカニズムの理解とした。磁気モーメントの変化を解析するためには、荷電粒子個々の運動を解析する必要がある。また、イオンと電子の荷電分離による電場の影響を考慮するためには、イオンと電子の運動を切り分けて解く必要がある。そこで本研究では、磁気スラストチャンバにおける推進剤プラズマを無衝突高温プラズマと仮定し、イオンと電子を粒子として扱う第一原理計算を行った。計算コードにはこれまで計算手法が十分に確立されている Full Particle-In-Cell (PIC)シミュレーションを用いた。

論文は以下の四章から構成される。

第一章では、近年の宇宙探査の動向および、将来の宇宙推進システムを紹介しつつ、将来の有人火星探査ミッションの短縮に期待されるレーザー核融合ロケットおよびその推進システムである磁気スラストチャンバについて解説し、これまでの研究をふまえて本研究の意義及び目的について述べた。

第二章では、本研究で用いた Full PICシミュレーションの計算手法、計算体系について説明し、計算の妥当性検証結果について述べた。

第三章では、磁気スラストチャンバをスケールダウンした計算結果について、プラズマ挙動、イオンデタッチメントの判断と物理メカニズム、電子デタッチメントの判断と物理メカニズムの観点からそれぞれ述べた。

第四章では、本論文の総括を述べた。

本研究で得られた成果を以下4点にまとめる。

1. 第一原理に基づき、位置空間2次元、速度空間3次元で電子及びイオンの振る舞いを追える数値解析コードを整備した。デタッチメントメカニズムを解明するために、個々の粒子の運動を描写する粒子法とプラズマの運動に伴う電磁場の構造変化を描写する Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を組み合わせた数値解析コードを整備し、エネルギーバランスや粒子の振る舞いから整備したコードの妥当性を示した。

2. 整備した数値解析コードを用いて、電子が磁力線からデタッチすることを初めて明らかにした。電子密度の空間分布の時間変化はイオン密度の空間分布の変化とほぼ同じであり、時々刻々変化する電子の流束も磁力線の方向ではなく、イオンの流束と同じ方向を向いており、電子はイオンの運動に従って運動していることを初めて示した。また、ほとんどのイオンや電子は初期の磁気モーメントが保存されていないことを明らかにし、レーザー核融合ロケットの磁気スラストチャンバにおいて、プラズマが磁力線からデタッチすることが明らかになった。

3. イオンデタッチメントのメカニズムが明らかになった。磁気スラストチャンバ内部において、ほとんどのイオンのラーマ半径が磁場変化のスケール長よりも大きいことを示し、これによりイオンがデタッチすることを明らかにした。また、レーザー核融合ロケットの力積は、デタッチメントを考慮しても損なわれないことを示した。

4. 電子デタッチメントのメカニズムが明らかになった。磁場とプラズマの相互作用の結果生じる磁気壁近傍の磁場勾配が大きい領域において、電子ラーマ半径が磁場変化のスケール長よりも大きくなるときに電子はデタッチすることを示した。また、電子はプラズマ振動と考えられる変動電場が疑似衝突となり、磁気モーメント保存が破れてデタッチすることを示した。また、荷電分離で生じる静電場による電子のデタッチメントはほとんど見られないことを明らかにした。