

第一原理粒子計算を用いた 非定常磁気ノズルからのプラズマ離脱過程の検証

Investigation of plasma detachment process in an unsteady magnetic nozzle
using Full Particle-In-Cell simulation

研究代表者：児島 富彦（九州大学総合理工学府先端エネルギー理工学専攻）
t.kojima.500@s.kyushu-u.ac.jp

研究分担者：山本 直嗣（九州大学総合理工学研究院）
yamamoto@aees.kyushu-u.ac.jp
担当：計算結果の理論的検討

研究目的 (Research Objective):

人類の生存圏拡大を目的とした火星移住計画に注目が高まっているが、既存の化学ロケットを使用すると火星までの航行に 250 日程度を要するため、乗員への放射線暴露や閉鎖空間で過ごす精神的負担が問題となる。そこで、火星までの航行を 90 日程度に短縮できる次世代の高速宇宙船が検討されており、候補の一つがレーザー核融合ロケットである。レーザー核融合ロケットは、核融合燃料にレーザーを照射する方式の慣性核融合を利用する宇宙船である。核融合反応では単位質量あたりに発生するエネルギーが化学反応より 7 桁大きいため、容易に高エネルギープラズマが得られる。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の力で機体後方に押し出すことで加速度、即ち推力を得る推進機構が考案されており、磁気スラストチャンバと呼ばれる。先行研究では、磁気スラストチャンバ内で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等が行われ、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いて磁力線は機体の周りを一周しているため、機体後方に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[Fig.1]。そこで本研究目的を、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する。

磁気スラストチャンバでは、高エネルギーのプラズマが磁場中を膨張していく過程で密度勾配が生じ、プラズマ中に反磁性電流が流れる。反磁性電流の影響で初期に存在した磁場形状が変わる。プラズマ中の磁場は弱められる一方、プラズマ外部の磁場が強められる。やがて、外部磁場の圧力がプラズマ圧を上回る時点で、押し返しが始まるため、プラズマ圧と磁気圧の比によって、磁気スラストチャンバ内部の挙動を整理できると考えられている。そこで、本研究でも、プラズマ圧と磁気圧に着目し、デタッチメントとの関連を探る。

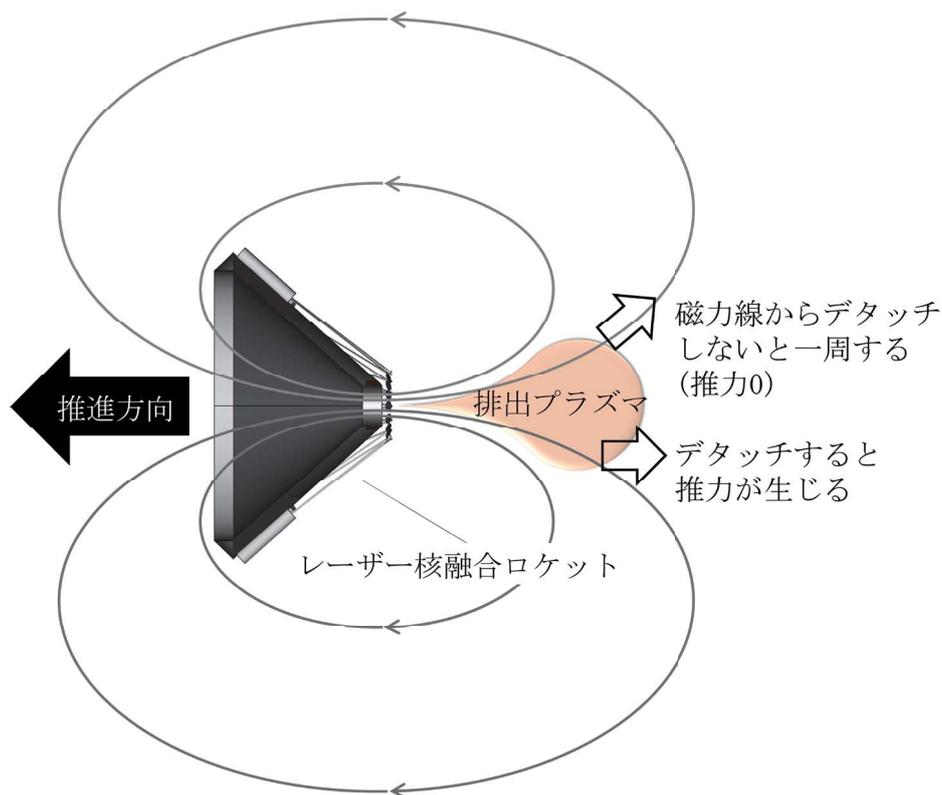


Fig.1 レーザー核融合ロケットの推進方向およびデタッチメントの重要性

計算手法 (Computational Aspects):

磁気スラストチャンバでは、プラズマは磁場中を膨張するため非定常的な流れとなる。そのため計算空間を広く用意する必要があるが、広い3次元空間を行うには計算コストの問題が生じる。そこでまず、計算を2次元空間に簡易化しデタッチメント検証を行う。

本研究では、2次元電磁粒子コード (EPOCH) を用いたイオンと電子の粒子計算を行った。並列化はMPIによる領域分割法を用いる。本研究では、Fig.2に示すように初期膨張半径内に存在する超粒子が拡散し、計算が進むにつれて1grid当たりの粒子数が変化する。そのため、一定周期ごとに1プロセスが取り扱う粒子数がバランスされるように受け渡しを行い、効率化を図る。コイル磁場は初期状態で挿入する。境界条件は超粒子、電磁場ともに自由境界としている。

先行研究より、磁場のエネルギーはプラズマエネルギーの5倍程度で磁気スラストチャンバとして作用することが確認されているため、本研究でも同様の磁場強度を初期状態とした。プラズマはMaxwellの速度分布に従って膨張した1価の水素プラズマと仮定し、密度 10^{24} m^{-3} 、温度 1 keV を初期状態とした。計算精度を保証するためにgrid幅を初期のデバイ長程度に設定し、grid数を $(x, y) = (5000, 8000)$ としたため、計算体系は実際のスケールを縮小したものとなる。また、イオンと電子の質量差による影響を考慮した計算を行うためにイオン質量を電子質量の100倍とし、現実的な実行時間での計算を行った。

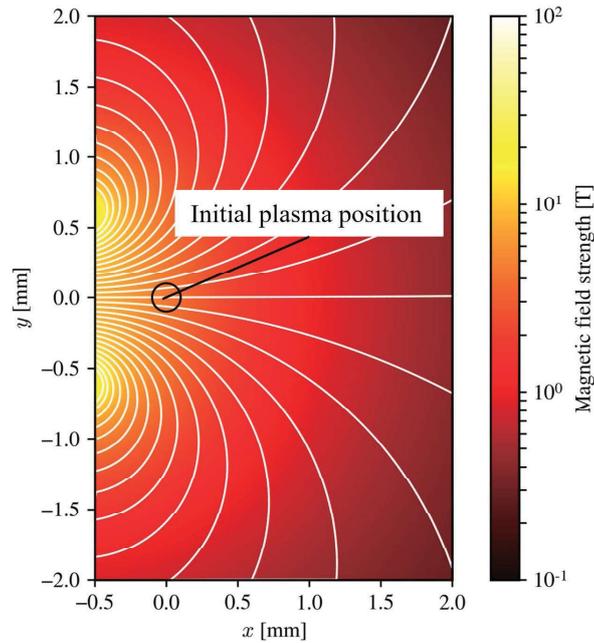


Fig.2 計算体系と初期磁場形状。プラズマは初期位置(黒円の内側)から膨張する。

研究成果 (Accomplishments) :

Fig.3 にイオン密度分布と磁力線の時間発展を示す。初期膨張時 ($t = 0.2$ ns) には上流側 ($x < 0$ mm) でプラズマ外部の磁場強度が上昇したのち、磁場がプラズマを押し戻して排出している過程が確認された。この磁場圧縮は先行研究でも確認されており、磁気スラストチャンバの典型的挙動が確認された。

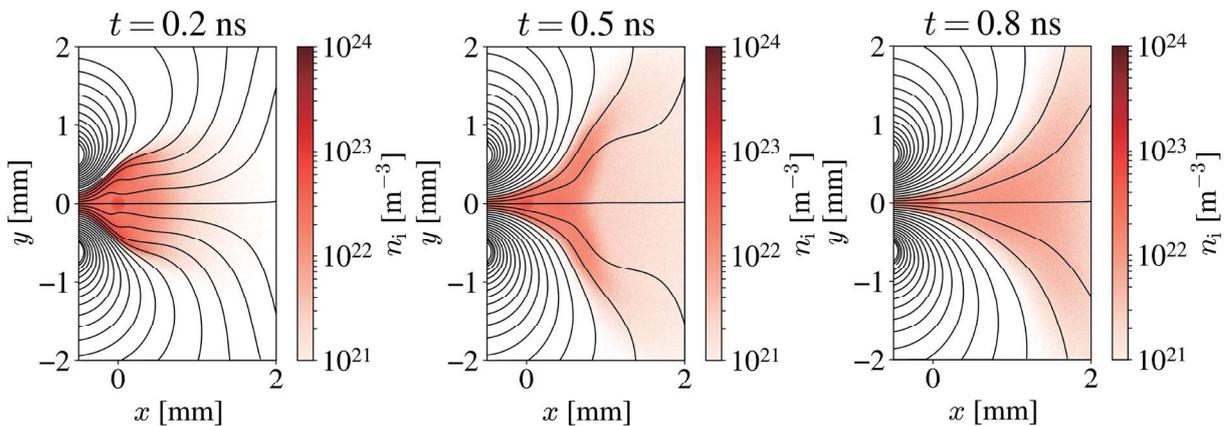


Fig.3 イオン密度空間分布と磁力線の時間発展

電子密度も同様の分布を示したため、イオンと電子が下流 (排出) 方向に移動することが確認された。また、プラズマ膨張に伴って外部の磁場が圧縮され、プラズマ境界における磁場強度が上がるにも拘わらず、磁力線に沿って一周する超粒子はほとんど存在しないことが確認された。

計算領域をイオン慣性長程度で区切り、流体的速度とイオン密度からイオン動圧(P_{ki})を計算し、磁気圧(P_B)との比を取った kinetic beta の空間分布の時間発展を Fig.4 に示す。 $t = 0.2$ ns における $x > 0$ mm にてイオン動圧が磁気圧の 20 倍を超えており、磁場が弱い下流側に向かう際には磁場による速度変換がされないことを示す。一方、 $x < 0$ mm においては、イオン動圧は磁気圧の 0.5–1 倍程度になっており、磁気圧が支配的となりプラズマを押し返す状態になっている。しかし、これらのプラズマも磁束密度が低い下流領域 ($x > 0$ mm) へ移動することにより、 $t \geq 0.5$ ns では下流側に流れ、イオンの動圧は磁気圧の 20 倍を超えて磁場の影響を受けなくなる。

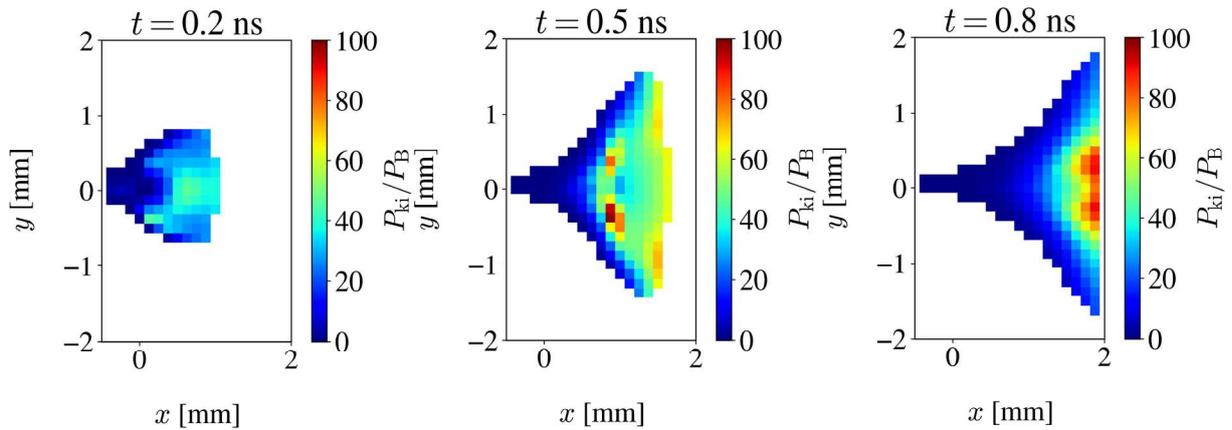


Fig.4 イオン kinetic beta 空間分布の時間発展

下流に排出されるプラズマ中に磁束が保存されているならば、磁場がプラズマを押し返したのちに磁気張力が働き、プラズマを引き戻す可能性がある。そこで外部磁場の磁束の変化を確認した。 Fig.5 に代表的に $y = 0.5$ mm において、 y 方向の磁束密度を $-x$ 境界からプラズマ領域と外部磁場との境界点までの区間において積分して計算した磁束の 0.2 ns– 0.9 ns における時間発展を示す。磁束は初期状態において $-x$ 境界から $+x$ 境界までの y 方向磁束密度を積分した値で無次元化し、値が 1 に近づくほど初期の磁束に近づくことを示す。もし、下流方向に移動するプラズマ中の磁束が保存されるならば、プラズマ外部の磁束も保存されるため、値は変動しないはずである。しかし、膨張したプラズマが $y = 0.5$ mm に到達する $t = 0.2$ ns 以降において、求めた磁束は時間発展と共に増加を示す。即ちプラズマ中の磁場が保存されておらず、プラズマが磁場を連れていかないことを示す。そのため、磁気圧によってプラズマが押し返されたのちに、磁気張力によって引き戻される効果は働いていない。

以上より、本研究では、磁気スラストチャンバにおいてプラズマ圧が磁気圧を上回る状態になり、かつプラズマ中に磁束が保存されていないため、デタッチしていると考えられる。今後、詳しいメカニズムの解析やより精度を上げた計算を行い、プラズマデタッチメントについての理解を深めていく。

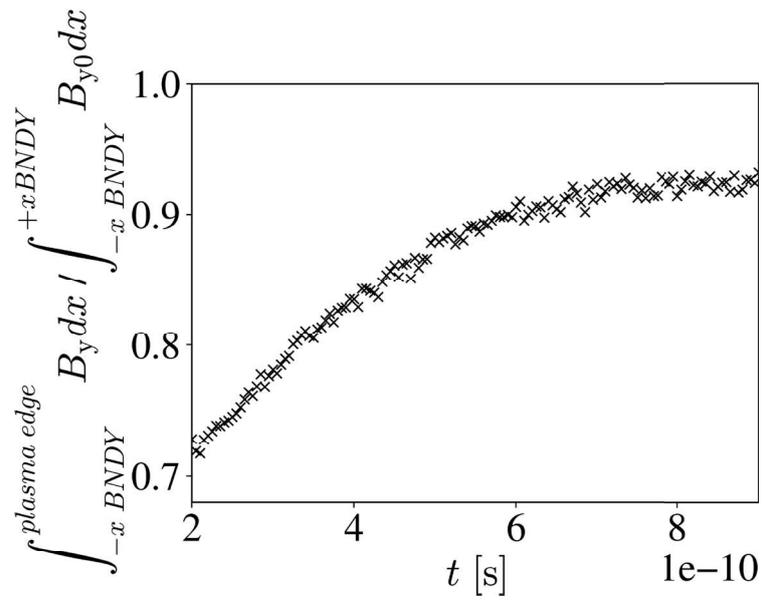


Fig.5 -x 境界ープラズマ境界間の y 方向磁束の時間発展($y = 0.5$ mm)

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. 児島富彦, 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, 九州大学博士論文, 2022年2月