

磁気ノズルを用いた先端推進機の推力評価に向けた ハイブリッド粒子シミュレーション^{*1}

梶村好宏^{*2} Yoshihiro KAJIMURA ・ 中島秀紀^{*3} Hideki NAKASHIMA

Key Words : Advanced Plasma Propulsion, Magnetic Nozzle, Hybrid PIC Simulation

記号の説明

m : 質量
 t : 時間
 v : 速度
 η : 運動量変換効率

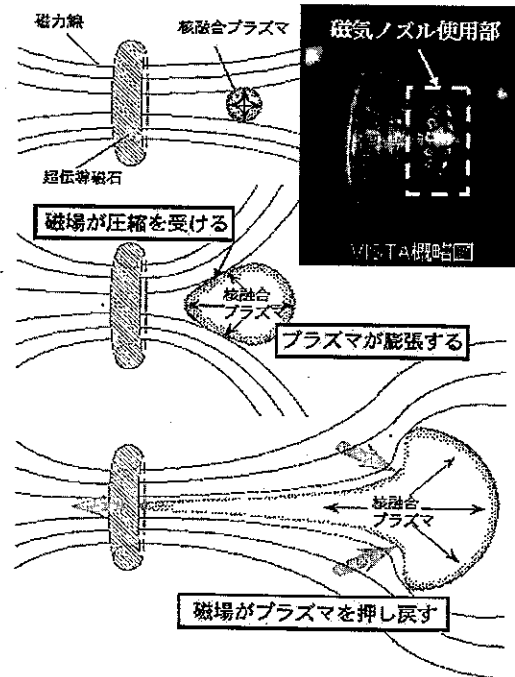
1. はじめに

現在、深宇宙での航行・探査における動力源は、電気推進が主として用いられている。今後、ミッションの低コスト化や期間の短縮、宇宙船積載容量の増大、あるいは有人飛行を視野に入れたミッションを実現するためには、電気推進よりもさらに高比推力、高出力の推進システムを開発することが望まれる。その候補の一つとして核融合ロケットが挙げられる。代表例であるレーザー核融合ロケットは、1972年、アメリカのHydeらが設計を提案し、さらにその設計を基にして、1987年にOrthらのグループが「VISTA」¹⁾を提案した。VISTA概略図を第1図の右上に示す。

このVISTAの特徴は、推進システムに磁気ノズルを用いていることにある。磁気ノズルを用いた他の次世代推進システムとして、VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) が挙げられる²⁾。VASIMRでは、高周波を使ってプラズマを生成、加熱する。高温になったプラズマは磁気ノズルによって、熱エネルギーから運動エネルギーへと変換され、宇宙空間に放出され、その反力として推力を得る仕組みである。国内では、東北大学のHITOP (HIgh density TOhoku Plasma) グループが同様の発散型磁気ノズルを用いた実験を進めている³⁾。HITOPグループでは、直線型磁場発生装置HITOPにMPDA (Magneto-Plasma-Dynamic Arcjet) をプラズマ源として設置し、高速プラズマ流のイオン加熱と磁気ノズル加速を

複合させた比推力の制御を世界で初めて実証した。これらに対し、本論文で紹介するVISTAに用いられる磁気ノズルが推進力を得る仕組みを第1図に示す。

プラズマ生成にはレーザー核融合を用いる。レーザー核融合は、球状にしたDT(重水素-三重水素)燃料(ペレット)にレーザーを照射することによって圧力を高め(爆縮)、核融合反応を起こす方法である。レーザー核融合によって生じたエネルギーが、ペレットを取り囲む推進剤に与えられ、その推進剤がプラズマ化し爆発的に膨張する。膨張するプラズマを磁場によって制御し、有効に推力に変換する仕組みがこの磁気ノズルである。この磁気ノズルの利点は、プラズマ噴出時にプラズマと固体壁の直接的な接触がないため、排出速度を高速にでき、その結果高いエネルギー変換効率を得られることにある。さらに、プラズマ生成とプラズマ加速を行う電極の損耗が推進機の寿命に直結する電気推進に対し、プラズマ生成とプラズマ加速を無



第1図 VISTA概略図と磁気ノズルの推力発生原理

^{*1}© 2012 日本航空宇宙学会

平成23年8月29日原稿受理 Hybrid Particle-In-Cell Simulations for an Improvement of Thrust Efficiency on Advanced Propulsion System Using a Magnetic Nozzle

^{*2}宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

^{*3}九州大学 大学院総合理工学研究院 エネルギー理工学部門

電極で実施でき、高寿命化を図っていることも磁気ノズルを用いた推進システムの特徴の一つである。VISTAでは、推進剤をプラズマ化して後方噴出するエネルギー源としてレーザー核融合を利用しているが、システム全体を相似則によってスケールダウンし、レーザー照射によるアブレーションのみによって燃料ペレットを加熱、プラズマ化、膨張させ、磁気ノズルによって後方に噴出し推進力を得る利用も可能であると考えられ、原子力電気推進として検討がなされている⁴⁾。

本論文では、レーザー核融合あるいはレーザー照射によって推進剤をプラズマ化し、爆発的に膨張するプラズマを、磁気ノズルを用いて制御し推進力を得る手法について、粒子シミュレーションを用いた検討結果を紹介する。いかに運動量変換効率を高めるか、またいかに効率的に推進方向を制御するかという点について着目し、磁気ノズルを構成するコイルサイズや電流量を最適化し、推進システムとしての性能向上を図った結果について紹介する。また、真空チェンバー実験を実施し、推進力の測定と数値シミュレーションとの比較を行った結果についても紹介する。

2. 磁気ノズルにおける運動量変換効率

磁気ノズルの性能を評価する指標として、Z方向を推進方向と定義し、運動量変換効率を以下の式によって定義する。

$$\eta[\%] = \frac{\sum mv_z \text{ (全Z方向運動量)}}{\sum m|v_0| \text{ (全初期運動量)}} \quad (1)$$

すなわち、運動量変換効率の向上は、等方膨張するプラズマの運動量を、Z方向に効率的に変換することによって達成される。

3. 数値解析手法

磁気ノズルを形成するコイルが受ける力は、第1図に示したように磁場がプラズマを押し戻す電磁気学的な力の反作用として生じ、この現象では、運動量変化を受けるプラズマ中のイオンの挙動が支配的である。よって、磁場中のイオン運動スケール、イオン運動時間のスケールにおける現象を評価可能な解析モデル(3Dハイブリッド粒子コード)を用いる。3Dハイブリッド粒子コード⁵⁾は、イオンを粒子、電子を慣性を無視した流体として扱うコードである。このコードの特徴は、電子の運動(プラズマ振動、サイクロトロン周波数)のタイムスケールで起こる現象の影響を除去し、時間幅や空間幅を大きくできる点にある。荷電準中性条件を仮定し、イオンと電子の数密度があらゆる所で等しいと置き、プラズマ振動を除去する。また、電磁場は、プラズマの運動も含めて自己無撞着に解かれる。計算手法の詳細は文献6)を参照願う。文献6)では、開発した本コードの妥当性を検証するために、プラズマ中を伝播する電磁波の分散関係を計算し、計算値と解析解とを比較している。結果として、計算値と解析解とは良い一致を示しており、コードの妥当性が確かめられている。

4. 数値解析結果

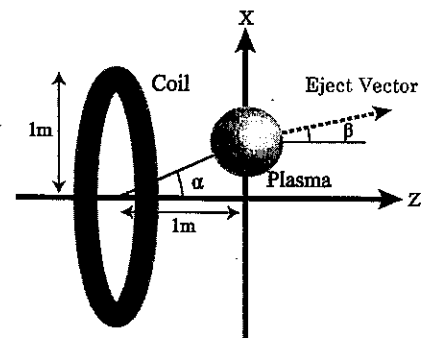
本章では、磁気ノズルを形成するコイルシステムについて、3つのシステムを取り上げる。はじめに、円形コイルを1個用いた場合、次に、円形コイルを2個用いた場合、最後に、矩形コイルを環状に組み合わせた場合を検討し、推力最適化、推力ベクトルの制御手法の観点から、数値解析によって得られた結果を整理する。最後に、円形コイルを1個用いた場合において、推進剤の整形によって運動量変換効率が向上した例について紹介する。

4.1 磁気ノズルの運動量変換効率の評価(1個のコイルを用いた場合の検討) Vchivkovらにより、円形コイル1個を用いる磁気ノズル中のプラズマ挙動を再現する実験が行われた⁷⁾。この実験では、VISTAに用いられる磁気ノズルにおいて想定されるパラメータに対し、相似則を用いてスケールダウンしたパラメータが用いられている。この実験では、核融合によるエネルギー付与ではなく、レーザーアブレーションによって推進剤にエネルギーを与えている。磁気ノズル中でのプラズマの挙動について、3Dハイブリッド粒子コードを用いた解析と実験が比較され、良い一致が得られた⁷⁾。この論文では、3Dハイブリッド粒子コードによって得られた結果の妥当性を示すと同時に、その運動量変換効率 η を65%と評価している。この変換効率は、コイルと推進剤プラズマの位置関係を最適化して得られた結果である。

4.2 推力ベクトルの評価(1個のコイルを用いた場合の検討) その後、著者らは、運動量変換効率だけでなく、推進方向の制御についても検討し、Vchivkovらのスケールダウンされた同一の解析パラメータを用いて検討した⁸⁾。第2図に解析モデルを示す。

通常、磁気ノズルを作る超伝導コイルの中心軸上に燃料ペレットおよび推進剤が配置されるのであるが、その位置を変化させることによって、排出ベクトルを制御する手法である。第2図に示した角度 α を変化させることによって、排出方向 β を制御し、推力ベクトルを制御する。

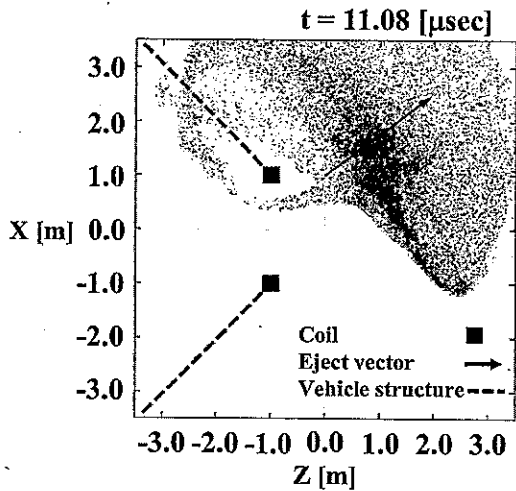
第3図に、 $\alpha=45$ 度の場合の解析結果を示す。第3図は、第2図の解析モデルにおいて、初期プラズマ半径0.3m、4MJのエネルギーを得た等方膨張するプラズマが磁気ノズルによって制御され、 $\beta=39$ 度の角度をもって噴出



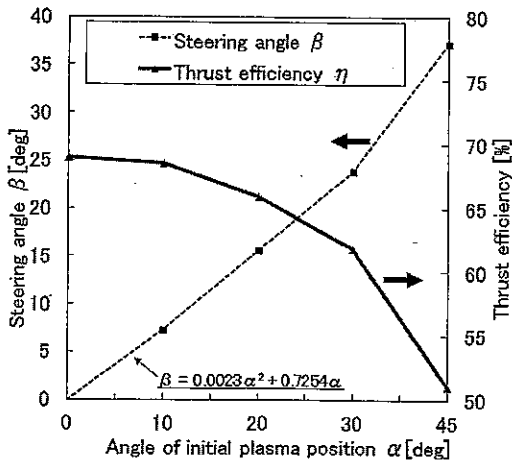
第2図 解析モデル図(1個のコイルを用いた場合)

される様子を示したものである。コイルには $3\text{ MA} \cdot \text{turn}$ の電流を流し、磁気ノズルを形成している。初期プラズマ位置の β 値 (プラズマの動圧と磁気ノズルの磁気圧比) は 0.16 である。第3図の黒点はプラズマ化したイオンを示している。この場合、黒点線で示した宇宙機の壁に、磁気ノズルによって排出されたプラズマが衝突してしまい、損傷を受けることが予想され、この位置での初期プラズマの配置には問題があることを示している。これを回避するためには、宇宙機壁面を損傷しない位置まで移動させるか、 α を小さくすればよいわけであるが、これらの回避法は、運動量変換効率と得られる排出ベクトルの兼ね合いによって選択されるべきである。

第4図に、運動量変換効率 η および排出ベクトル β の α 依存性を示す。排出ベクトル、つまり推力ベクトル β を制御するためには、燃料ターゲット射出ならびにレーザー照射の位置を制御することが必要であり、高い技術が必要である。しかし、第4図に示すように、わずかな発生位置のずれで大きな推力ベクトルの変化を得ることができ、シミュレーションによる推算では、コイルの中心軸上からプ



第3図 イオン粒子分布図 (1個のコイルを用いた場合)

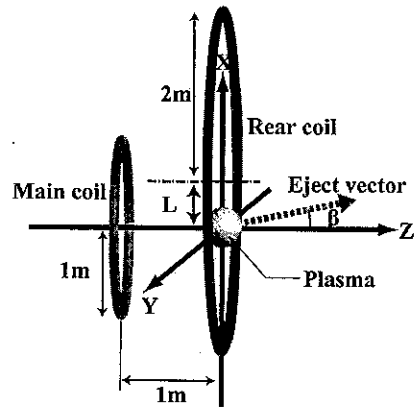


第4図 1個のコイルを用いた場合の運動量変換効率および排出ベクトル β の α 依存性

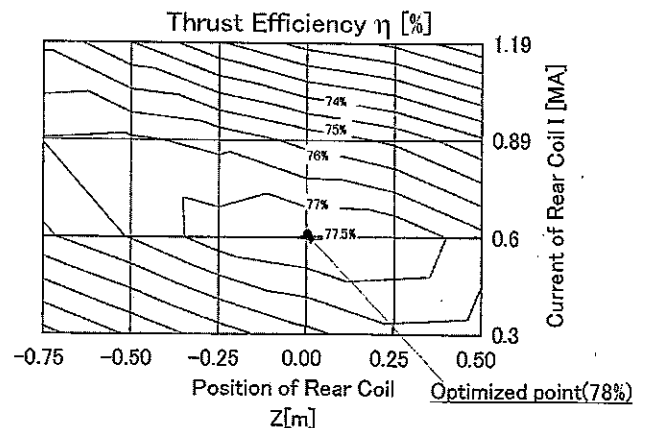
ラズマ生成位置を 10 度ずらすことで約 7 度の推進方向変化を得ることができる。その際の運動量変換効率の変化は少ない。しかし、 25 度程度の推進方向制御を得るためには、発生位置を 30 度ずらす必要があり、その際には著しく運動量変換効率が下がり、約 10% 低下する。

4.3 磁気ノズルの運動量変換効率の評価 (2個のコイルを用いた場合の検討) 次に、円形コイルを2個用いた場合の検討結果について紹介する。著者らは、同軸上に並べられた2個のコイルによって構成された磁気ノズルにおいて、コイルに流す電流とコイルの位置を最適化し、最良の運動量変換効率を得られるパラメータを算出した。その結果、最大運動量変換効率は 78% に改善された⁹⁾。第5図にコイルを2個用いた場合の磁気ノズルシステムの解析モデルを示す。

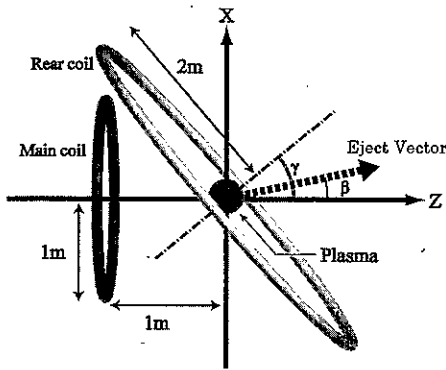
このモデルも、Vchivkovらのスケールダウンされた同一の解析パラメータを用いている。はじめに、第5図の $Z=0, L=0$ に配置された2個目のコイル (Rear coil) の Z 方向位置やコイルに流す電流を最適化し、もっとも高い運動量変換効率を達成可能なパラメータを算出している。第6図に運動量変換効率の等高線を示す。 $Z=0$ 、コイル電流 $0.6\text{ MA} \cdot \text{turn}$ の場合、最大運動量変換効率 78% (約 80%) が得られることを示している。運動量変換効率を高



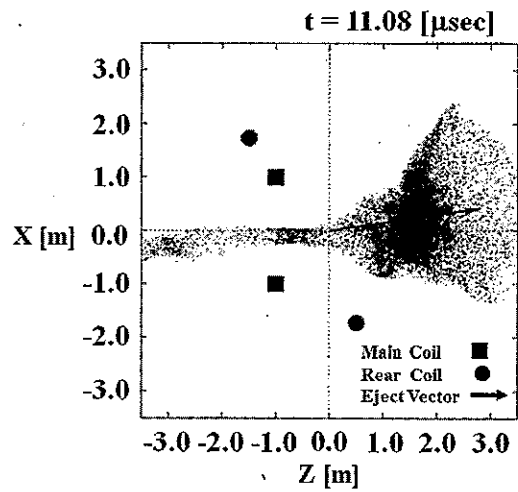
第5図 解析モデル図 (2個のコイルを用いた場合)



第6図 Rear coilの位置と電流を変化させた場合の運動量変換効率 η の等高線図 (2個のコイルを用いた場合)



第7図 解析モデル図 (2個のコイルを用いた場合における、 γ の変化による排出ベクトル制御)



第8図 イオン粒子分布図と排出ベクトル (2個のコイルを用いた場合における $\gamma=45$ 度のケース)

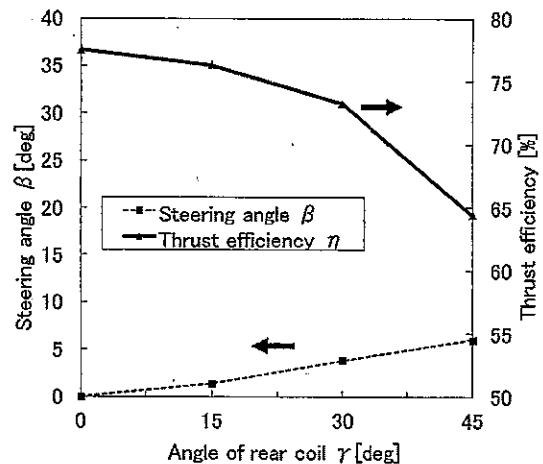
めるためには、コイルの数を増やし、プラズマの運動量を効果的に変換、制御することが有効と考えられる一方、コイルの増加による推進システム全体の重量増加の問題も考慮する必要がある。コイルを2個用いる場合、運動量変換効率を約80%にまで高めなければ推進システムとして成立しない⁹⁾。

4.4 推力ベクトルの評価 (2個のコイルを用いた場合) 次に、2個のコイルを用いた場合の推力ベクトル制御手法について検討した結果を紹介する。第5図に示した Rear coil の X 方向位置 L を変化させることによって、磁気ノズルの形状を変化させ、プラズマの排出方向を制御する手法である。この手法では、 L を大きく変化させたとしても (最大でもコイル半径: 1m)、得られる排出ベクトル β は3度以下と非常に小さい結果となった。

そこで、第7図に示すように Rear coil の中心軸角度 γ を変化させることによって、排出ベクトルを変化させる手法が提案され、検討された⁹⁾。第7図に解析モデルを示す。コイルを傾けない場合の Rear coil のサイズと電流値は、4.3章で検討された運動量変換効率を最適化した後のパラメータを用いている。このパラメータをベースとし、Rear coil の角度 γ に対してプラズマの排出方向 β がどのように変化するかについて検討した。

第8図に、 $\gamma=45$ 度の場合の解析結果を示す。図の黒点はプラズマ化したイオンを示している。1個のコイルを用いた場合よりも排出されるプラズマは Z 方向に集向されていることが分かり、さらに、Rear coil の傾きの変化によって排出方向を制御できることが確認できる。

第9図に γ を変化させた場合の運動量変換効率 η と排出ベクトル β の関係を示す。コイルの位置 L を変化させた時と同様に、 γ を大きく変化させても、得られる排出ベクトルの変化は5度程度と小さい上に、運動量変換効率の減少も大きい。推力ベクトルの変化を5度得たい場合、2個のコイルを用いた場合の64%と比較して1個のコイルを用いた手法 (第4図) における運動量変換効率は68%と高い。2個のコイルを用いた場合において、第2図のように初期プラズマ位置 α を変化させたケースも検討したが、Rear coil と初期プラズマが $Z=0$ の位置にあるため、

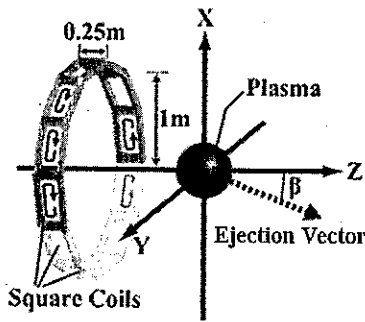


第9図 γ を変化させた場合の運動量変換効率 η と排出ベクトル β の依存性 (2個のコイルを用いた場合)

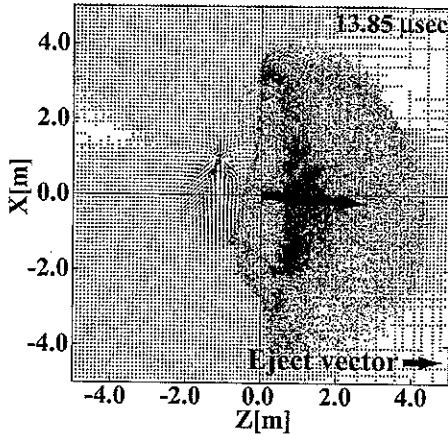
α の可変範囲が小さく、得られる推力ベクトルも小さい。2個のコイルを用いる場合は、最大運動量変換効率を得るには適しているが、推力ベクトルを制御するには不向きであると結論付けることができる。

4.5 磁気ノズルの運動量変換効率と推力ベクトルの評価 (複数の矩形コイルを用いた場合の検討) 第10図に、複数の矩形コイルを環状に並べて磁気ノズルを作るシステムの解析モデルを示す。この手法は、個々の矩形コイルに流す電流を変化させ、磁気ノズルの形状を変化させることによって運動量変換効率の調整 (可変推力) や推力ベクトルの制御 (可変推力ベクトル) を容易に実現可能なシステムである¹⁰⁾。また、このシステムでは、複数のコイル間に働く力を小さくできることや、推力ベクトルを制御するために、システム自体を傾ける機構を排除することができることから技術的には2個のコイルを配置するシステムよりも容易と予想される。

第11図に、 $X<0$ の位置のコイル電流を0とした場合の排出プラズマの位置および、磁気ノズルが形成する磁場



第10図 解析モデル図 (複数の矩形コイルを組み合わせた場合)

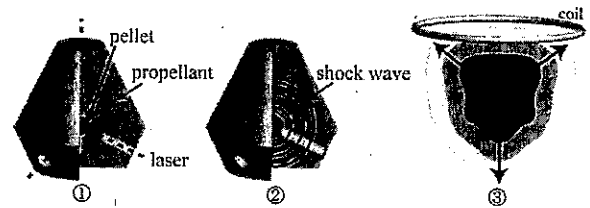


第11図 イオン粒子分布図と排出ベクトル (複数の矩形コイルを組み合わせた場合において、 $X < 0$ の位置のコイル電流を0とした場合)

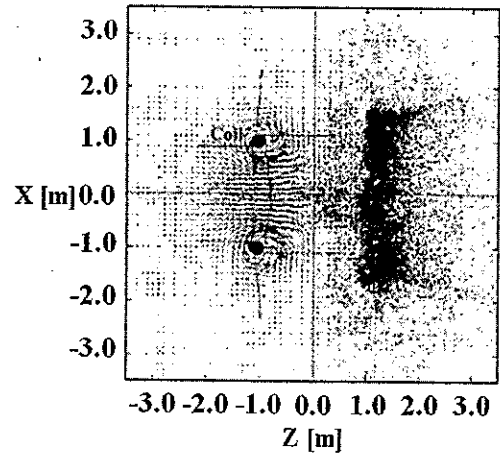
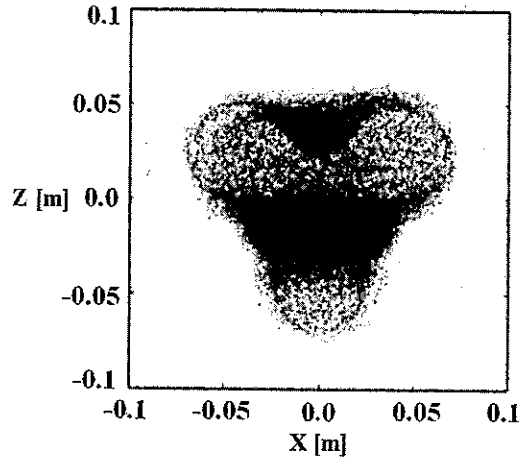
ベクトルを示す。Y=0の断面に着目して磁場ベクトルを確認すると、 $X < 0$ の位置におけるコイル電流を0とすることによってX方向に強い磁場ベクトルが形成され、第3図や第8図に確認できる-Z方向(つまり宇宙機方向)へ侵入するプラズマを完全になくすることができる。このことは運動量変換効率向上と、磁気ノズル中を逆方向に進むプラズマが推進機にダメージを与える影響を防ぐことができる点で画期的な手法である。しかし、この手法の運動量変換効率、すべての矩形コイルに通電させた場合、56%程度であった。一方、 $X < 0$ の位置のコイル電流を0として、推進ベクトルを5度得る際の運動量変換率は逆に約60%と上昇した。運動量変換率が小さかった要因として、この解析に用いたプラズマ β 値が、0.5と大きいことが挙げられる。今後、プラズマ β 値を0.1程度とした解析によってこの推進システムの有用性を確認したい。

4.6 整形ターゲットを用いた推力ベクトル制御手法の検討 磁気ノズルを用いた推進システムにおいて推進ベクトルを制御する手法として、核融合ターゲットを囲む推進剤の形状に注目した整形ターゲットを利用するというアイデアが提案された¹¹⁾。

核融合のエネルギーが整形された推進剤に与えられた後のプラズマ化した推進剤の振る舞いについて、SPH法¹²⁾を用いて解析を行い、その結果を3Dハイブリッド粒子



第12図 整形ターゲットにエネルギーが与えられる過程 (時間変化は、①から③へ)



第13図 SPH法を用いて解析したプラズマ分布図(上)、3Dハイブリッド粒子モデルを用いて磁気ノズル中の挙動を解析して得られたイオン粒子分布図(下)

コードに引渡し、運動量変換効率を計算するという試みが行われた¹¹⁾。第12図に、整形ターゲットにエネルギーが与えられる過程を示す。ターゲットの中心に核融合ペレットを配置して周囲の推進剤を図のように整形し、レーザーを照射し核融合反応(あるいはレーザーアブレーション)を起こす(①)。核融合反応で生じたプラズマは周りの推進剤をプラズマ化し、核融合反応で生じた衝撃波が推進剤の中を伝搬し(②)、推進剤が薄い部分から先に推進剤の外へ抜け、その部分のプラズマが先に噴出し、最終的に③のような形にプラズマが膨張する。この手法では、磁気ノズルの磁場形状を機械的に変えることなく効率的に推進方向を制御することができる。

第13図の上図にSPH法を用いた解析結果を示す。図の

灰色の点がプラズマ化された推進剤を示しており、第12図の③のように、特定方向(コイル方向)への速い速度をもったプラズマが形成されていることが確認できる。この速度分布、密度分布を3Dハイブリッド粒子モデルに引渡し、1個のコイルを用いた磁気ノズルにおけるプラズマ挙動を計算した結果を第13図の下図に示す。図の黒点がイオン、矢印は磁場ベクトルを表す。推進剤を整形しない場合における等方膨張の場合の運動量変換効率66%と比較し、整形した場合の運動量変換効率は78%へと向上した。同じ手法を用いた推力ベクトルの制御手法や核融合を想定した衝撃点火方式への対応を行うためのターゲット形状の検討なども行われている¹¹⁾。

本章では、磁気ノズルを形成するコイルシステムについて、3つのシステムを取り上げた。結論として、多矩形コイルシステムが、運動量変換効率、推進ベクトル制御、システムの重量等の観点から有効であると考えられる。また、整形ターゲットを用いることでさらに運動量変換効率を向上させることが可能であり、推進ベクトルの制御も容易になると考えられる。

5. 地上実験による推力計測

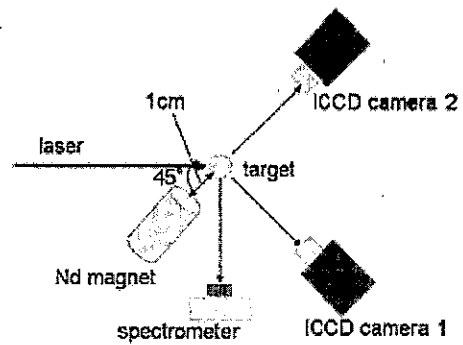
膨張するプラズマを磁気ノズル中に発生させ、実際にコイルに作用する力を測定する地上真空チェンバー実験が実施された^{13,14)}。実験体系を第14図に示す。

CHターゲットにレーザーを照射し、磁場によってプラズマがどのように振舞うかを観測し、3Dハイブリッド粒子モデルによる結果と比較している。第15図にプラズマ挙動をICCDカメラによって撮影した実験結果と3Dハイブリッド粒子モデルによる解析結果を示す。図の灰色部分がコイルに相当し、プラズマが磁場によって挙動を変えられている様子が実験結果から見てとれる(コイル磁場が無い場合は灰色部分へプラズマが飛散する)。解析結果についても、おおよそ実験結果を再現する結果となっているが、等方膨張を仮定して初期プラズマ速度を定義した数値解析結果に対し、実験ではレーザー照射の方向に依存した異なる速度分布をもっていると考えられ、その差が実験と解析の違いの要因であると推察される。

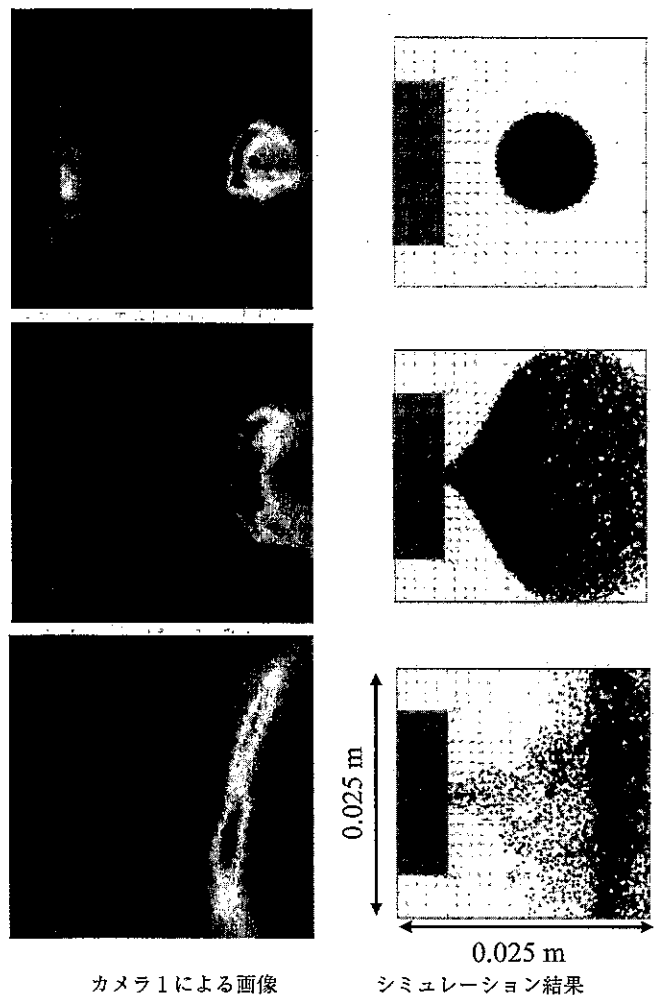
振り子式推力スタンドを用いて計測した推力(インパルスビット)は、数値計算が2.3 μNsに対し、実験では1.5 ± 0.2 μNsとなり、推力が実際に計測されたと同時に、実験と解析結果についても、おおよそ良い一致結果が得られた。推力計測に関する実験と解析との差異については、レーザーアブレーション後の初期プラズマ速度分布の条件の違いに加え、磁場分布の差についても違いを生じる要因として挙げられており、今後さらに検討を進める必要があると結論付けている。

6. まとめと今後の課題

本論文では、先端推進の数値シミュレーションとして、磁気ノズルを用いた推進システムを紹介し、特に核融合ロケット VISTA に用いられる磁気ノズルを用いた推進シス



第14図 実験体系



カメラ1による画像 シミュレーション結果
第15図 プラズマ挙動を撮像した実験結果(左)と3Dハイブリッド粒子モデルによる解析結果(右)
上から $t=200\text{ ns}$, 500 ns , $1.5\text{ }\mu\text{s}$.

テムについて、これまでの研究成果をまとめた。

磁気ノズル中のプラズマ挙動について、3Dハイブリッド粒子モデルを用いて解析し、運動量変換効率の向上や推力ベクトルの制御について検討した結果を紹介した。磁気ノズルを形成するコイルを複数用いた場合や複数の矩形コイルを用いた場合の運動量変換効率や得られる推力ベクトルについて検討した結果、多矩形コイルシステムが、運動量変換効率、推進ベクトル制御、システムの重量等の観点

から有効であると考えられる。また、整形ターゲットを用いることでさらに運動量変換効率を向上させることが可能であり、推進ベクトルの制御も容易になると考えられ、整形ターゲットと矩形コイルと組み合わせた推進システムの検討を実施したい。

今後の課題は、大きなゲインがとれるターゲットの設計や、磁気ノズル中のプラズマによって誘起される反磁性電流をエネルギーとして再利用する装置の検討および設計である。また、磁気ノズルからのプラズマの引き離し(プラズマデタッチメント)が本当に起こり得るかという点が、磁気ノズルを用いた推進システムの実現可能性を議論する上で常に問題となっている。磁化プラズマ中では、イオンと電子のラーマー半径の違いから荷電分離が生じ、電場が発生する。その電場によって、磁気ノズルから放出されるイオンが引き戻され、推力発生を困難にすると考えられている。著者らは、このデタッチメントの可否、またその成立条件(つまり磁気ノズル構造、プラズマ密度、速度などのパラメータ)について、イオンと電子を扱う Full-PIC コードを用いて、明らかにすべく研究を続けている¹⁵⁾。

本研究に携わった九州大学総合理工学研究院エネルギー理工学部門中島秀紀研究室の研究者の皆様(山本直嗣助教、坂口申康氏、川淵亮氏、前野旭弘氏、松田伸夫氏、花屋倫生氏、林田憲治氏)に深く感謝申し上げます。また、本計算は、九州大学情報基盤センターの支援を受けて実施いたしました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Hyde, R. A., Wood, L. L., Jr. and Nuckolls, J. H.: Prospects for Rocket Propulsion with Laser-Induced Fusion Microexplosions, AIAA Paper 72-1063, 1972.
- 2) Chang Diaz, F. R.: The VASIMR Rocket, Sci. Am., 283, 5 (2000), p. 90.
- 3) Ando, A., Inutake, M., Hattori, K., Shibata, M. and Kasashima, Y.: ICRF Heating and Plasma Acceleration with an Open Magnetic Field for the Advanced Space Thruster, Trans. Fusion Sci. Technol., 51 (2007), p. 72.
- 4) Nagata, H., Nishiyama, T. and Nakashima, H.: Proposal of Space Reactor for Nuclear Electric Propulsion System, ists26 (ISTS Special Issue: Selected Papers from the 26th International Symposium on Space Technology and Science), Trans. JSASS Space Technology Japan, 7 (2009), pp. Tb_15-Tb_18.
- 5) Horowitz, J. E., Shumaker, D. E. and Anderson, D. V.: QN3D: A

Three-Dimensional Quasi-Neutral Hybrid Particle-in-Cell Code with Applications to the Tilt Mode Instability in Field Reversed Configurations, J. Comput. Phys., 84 (1989), pp. 279-310.

- 6) 村中崇信, 長峯嘉彦, 内村英幸, 中島秀紀: プラズマ挙動解析のための3次元ハイブリッドコードの開発, 九州大学大学院総合理工学報告, 22 (2000), pp. 309-314.
- 7) Vchivkov, K. V., Nakashima, H., Zakharov, Y. P., Esaki, T., Kawano, T. and Muranaka, T.: Laser-Produced Plasma Experiments and Particle in Cell Simulation to Study Thrust Conversion Processes in a Laser Fusion Rocket, Jpn. J. Appl. Phys., 42 (2003), pp. 6590-6597.
- 8) Kajimura, Y., Kawabuchi, R. and Nakashima, H.: Control Techniques of Thrust Vector for Magnetic Nozzle in Laser Fusion Rocket, Fusion Eng. Design, 81 (2006), pp. 2871-2875.
- 9) 中島秀紀, 庄山英俊, 神田幸則: レーザー核融合ロケットの設計, 核融合研究, 66 (1991), pp. 291-319.
- 10) Kajimura, Y., Kawabuchi, R., Matsuda, N. and Nakashima, H.: Numerical Simulation of Fusion Plasma Behaviors in a Magnetic Nozzle, Trans. Fusion Sci. Technol., 51, 2T FUSTE8 (2007), pp. 229-231.
- 11) Matsuda, N., Kawabuchi, R., Kajimura, Y., Nakashima, H. and Zakharov, Y. P.: Improvement of Thrust Efficiency of Laser Fusion Rocket with Shaped Target, J. Phys.: Conference Series, 112 (2008), 042079.
- 12) Liu, G. R. and Liu, M. B.: Smoothed Particle Hydrodynamics a Meshfree Particle Method, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2003, pp. 201-254.
- 13) 花屋倫生, 前野旭弘, 山本直嗣, 中島秀紀, 藤岡慎介, 砂原淳, 城崎知至, 森 芳孝: レーザー核融合推進における磁気ノズルの検証に関する実験とシミュレーション, 第53回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2009-4394, 2009.
- 14) 花屋倫生, 前野旭弘, 安永将人, 山本直嗣, 中島秀紀, 藤岡慎介, 砂原淳, 城崎知至, 森 芳孝: レーザー核融合による磁気ノズルの推進性能評価, 平成21年度宇宙輸送シンポジウム論文集, STEP-2009-41, 2009.
- 15) Kawabuchi, R., Matsuda, N., Kajimura, Y., Nakashima, H. and Zakharov, Y. P.: Numerical Simulation of Plasma Detachment from a Magnetic Nozzle by Using Fully Particle-In-Cell Code, J. Phys.: Conference Series, 112 (2008), 042082.



梶村 好宏 (正会員)

1974年生まれ、京都府出身。2000年富山大学大学院理工学研究科エネルギー科学専攻博士課程修了。博士(工学)。株式会社CDAJを経て、2004年九州大学総合理工学研究院講師。2008年京都大学生存圏研究所産学官連携講師。2010年より宇宙航空研究開発機構 招聘研究員。専門はプラズマ物理学、プラズマ核融合学会会員など。

中島 秀紀 (正会員)

第59巻第691号(2011年8月号)243ページを参照下さい。