

直交外部磁場型 2次元MPDアークジェット

中田 大将*, 岩川 輝*, 國中 均**

Crossed Applied Magnetic Field 2D-MPD Arcjet

By

Daisuke NAKATA*, Akira IWAKAWA* and Hitoshi KUNINAKA **

Abstract : This paper describes the basic concepts of the Crossed Applied Magnetic Field 2D-MPD thruster. Especially, the way to construct optimized magnetic coil and the idea to avoid the operation limit due to the lack of charge carrier will be described. The thruster was newly designed and quasi-steady operation was successfully achieved using single PFN. Maximum 1.6T magnetic field was applied to the discharge chamber and the plasma impedance up to 1 ohm was recognized. This device will realize light-weight, high power EP system which enables not only economical but also short time space transportation.

Key words : MPD Arcjet, Electric Propulsion, Arc Discharge, Magnetic Coil Design

1. 序

1.1. 大電力電気推進におけるMPDスラストの位置づけ

MPD (Magnetoplasma dynamic) アークジェットは大電力電気推進において本命の候補であると考えられており[1], 口径5cm程度の放電室内に $n_e = 10^{20} \sim 10^{21} m^{-3}$ と云う高密度のプラズマを生成[2]し, 数十N[3]の推力を1000-6000秒の比推力レンジで発生することが可能である。即ち, 極めて大きい推力密度 ($>10000 N/m^2$), 極めて小さい比重量 ($<1 kg/kWe$) を供与し, 軽量の電源 (数 kg/kWe) との組み合わせにより軌道間, 惑星間においてパワフルな動力航行を可能とする。現状では太陽電池の比重量が $20 kg/kWe$ 程度でありスラスト本体のそれよりも遥かに重い。スラストそのものの比重量は問題にはならない。しかしながら, JAXAで開発の進んでいる薄膜太陽電池[4]や, 米国で実用化が始まっているレンズ集光型太陽電池[5][6]等はいずれも $2-3 kg/kWe$ 以下の極めて軽量の宇宙用電源であり, スラスト重量もやがては最重要スペックの一つになると考えられる。事実VIPER (25kW級イオンエンジン) [7]やNASA-457M (50kW級ホールスラスト) [8]といった米国の近年の大電力電気推進プロジェクトではスラスト比重量は必ず併記され, 重要指標と見なされていることが分かる。

表1 各種大電力電気推進システムの目標値

	消費電力 (単機)	推進効率	比重量 (Thruster Head+PPU)
イオンエンジン[9]	30kW	78%	6kg/kWe (PPU 4kg/kWe 含む)
ホールスラスト[10]	50kW	60%	2kg/kWe (PPU 1kg/kWe 含む)
MPD スラスト	数十 kW~MW	>40%	<1kg/kWe (PPU 及び放熱板がほとんど)

米国における大電力電気推進においてターゲットとされている電力レベル, 推進効率, 比重量を表1に示した。いずれのタイプの推進機もさらなる重量削減を目指して要素開発が進められている。しかしながら, 各種電気推進のメカニズムに起因する本質的な限界と云うものがあり, イオンエンジンでは空間電荷制限則による推力密度上限からスラストサイズが必然的に大きくなること, また高電圧使用によるコンポーネント絶縁体重量の増加が

* The University of Tokyo

** The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) /JAXA

避けられない。ホールスラスタでは円周状チャンネルに或る程度の外部磁場を維持しなくてはならないから、そのギャップ幅はあまり広げることが出来ず、単機での大型化を行うと中央部に大きな空間が出来る。これらの問題に対し、大電力イオンエンジンでは放電室プラズマの一層の高密度化が求められており、ホールスラスタではローカソードをボールピース部に配する、二重の円周チャンネルを持たせることで25%の重量減を目指すなどの工夫も創案されているものの[11]、やはり PPU(Power Processing Unit)と併せて 2kg/kWe 程度が達成可能なぎりぎりのラインと考えられる。

一方で、MPD スラスタ（及び DC アークジェット）は一对の陽極・陰極から成る本質的に簡素な構造であるから、難しいことを考えずともごく小さい比重量を達成することが可能であり、この点においてまさに大電力電気推進に適した候補であると云える。ミッション解析において電気推進の能力を評価する指標は、推進効率 η （これはスラスタへの投入電力のうち、何%が推進剤の運動エネルギーに変換されたかを示す値である）ではなく、推進効率を EP システム比重量($\alpha_{EP} + \alpha_{pow}$)で割った値に依る。即ち、EP システム割り当て重量の中で何 kW を発電し、そのうち何%を推進剤運動エネルギーに変換したか、が最終的な評価指標となる。これは古くから Stuhlinger の特性速度[12]として知られている。

$$v_{ch} = \sqrt{\frac{2\eta t}{\alpha_{EP} + \alpha_{pow}}} \quad (1)$$

推進効率 η を2倍にすることとシステム比重量($\alpha_{EP} + \alpha_{pow}$)を半減させることは等価であるから、電源側の比重量 2-3kg/kWe が実現するならば、MPD スラスタでは 40%程度の推進効率、1kg/kW の比重量で米国の提示する大型電気推進の目標値と肩を並べることが可能であり、さらなる推進効率・比重量の改善によってイオン・ホールには成し得ないミッションプランを提示することも期待できる。

MPD の場合、重量の多くは PPU と排熱板に尽きる。（これは、単機の推進機寿命が短くとも複数の代替ヘッド装着によって解決されることを暗に示唆している。）作動電圧が 100V 程度である MPD スラスタは太陽電池からのダイレクトな駆動も可能であり、500V～数 kV を使用する大電力イオン・ホールに対して PPU は相当量軽くなる。推進効率が低い放熱板が賄うべき排熱量は多いが、放電室温度も極めて高くなる（2000～3000 度）ことから、これに耐えるタングステン・モリブデン等の材料を用いて効率の良い放熱板設計が可能と考えられる。

このように、MPD スラスタは次期大電力スラスタとして極めて有望な位置づけにあり、また我が国は 1996 年の Space Flyer Unit など 3 度の軌道上試験を経験しており[13]、世界をリードする立場にある。

1.2. MPD スラスタの分類

MPD スラスタは大別すると、1) 自己誘起磁場型か外部磁場印加型か、2) 同軸型か矩形型か と云う分類が考えられる。この他、準定常作動か定常作動かと云う分類も考えられるが、準定常型は最終的には定常作動での実用化を念頭に置いており、研究段階において実験設備を簡素にするためのものであるから本質的な分類ではないと考える（過去には準定常での実用化も真摯に検討されたが、コンデンサ重量が嵩むことから準定常作動は定常作動に対してメリットは無いと判断される[14]）。

自己誘起磁場・同軸型は多くの機関で研究されており、多くの文献に当たることが出来る[3][15][16]。自己誘起磁場型の推力は $J \times B$ のローレンツ力において自己誘起磁場 $B \propto J$ を代入すると、放電電流 J の二乗に比例して増大すると分かる。推進効率に関しても例外なく放電電流と正の相関を持ち、有効な性能を発揮するには kA 級の電流が必要である。放電電圧は電極間ギャップをどの程度取るかによって大きく異なるが、高効率作動のためには電極降下電圧（～20V 程度）の占める割合を出来るだけ小さくすべきであり、100V 程度は欲しいところである。併せて考えると必然的に数百 kW～MW クラスでなければまともな効率にはならない。

自己誘起磁場・矩形型は旧宇宙科学研究所において 2 次元 MPD アークジェットとして長く研究されてきたも

のである[2][16]. 幅方向長さを自由に取れることから投入電力に応じてスラストサイズを柔軟に変化させられるが、やはり上記で述べた通り数百 kW 以上の作動が前提となる。

外部磁場型は電流 J と磁場 B を別々に制御可能であるため、比較的少ない電流(数百 A)・数十 kW の投入電力でも強い磁場を与えることによりそれなりの推力を維持し、高効率の作動が可能であると考えられている。一方で、外部コイルの搭載は MPD の最大のアドバンテージである比重量を増やす方向に働くため、実用的観点からは推進効率との兼ね合いで慎重な設計が行われるべきである。

外部印加磁場・同軸型は我が国では東京大学[18][19]、大阪大学[18][20]で盛んに研究された。また、近年では名古屋大学[21]にて新たに研究が始められている。同軸型では直ちに $J \times B$ のローレンツ力が排気方向を向くような磁場印加は不可能で、ホール加速・スワール加速と云った混在的な推力寄与のメカニズムが内在する[18][22]。磁場印加のパターンについては大阪大学でコイル形状を変化させ精力的に研究されたが、未だ最適な解は得られていない。

残る外部印加磁場・矩形型であるが、これは電磁加速の 1 次元モデル (図 1) を考える際に必ず通る形状であり、1960 年代には MHD 発電の逆過程としての学術的興味から、“Crossed-Field Accelerator” の通称で広く実験研究が行われていた[23][24]。当時のデバイスでは放電室圧力が高く、境界層の成長が問題となったようである。しかしながら、1970 年代以降現在まで大規模な実験的研究は行われていない。MPD 研究における米国の著名な先生方と、矩形型は同軸型に比べ研究活動がほぼ全く行われなくなったが、何か決定的な欠陥があったのかと云う議論をしたことがあるが、推進剤の横方向の閉じ込めを考える必要がある、と云った程度のことでそれ以上は特に思い当たらないとのことであった。

むしろ、外部磁場・矩形型は同軸型に対して次のようなメリットを有している。まず $J \times B$ のローレンツ力が直接排気方向を向くような外部磁場印加が可能である。また、同軸型と比べて外部磁場印加の自由度が高く強度分布に勾配をつける等の工夫も容易である。このような観点での研究は 1960 年代にも先例が見当たらない。

本研究では上記のような経緯から外部印加磁場・矩形型 MPD に焦点を当て、次世代大電力電気推進システムとしてふさわしいスペックを有した電磁加速スラストの実現を目指す。

2. 直交外部磁場印加 2 次元 MPD の可能性

2.1. 印加磁場の最適化

2.1.1. 準一次元解析による最適磁場形状

自己誘起磁場に比べて十分に強い外部磁場を与えた場合の印加磁場分布準一次元最適解は Jahn の著書[25]にも記されている通り、

$$B = \frac{E}{u} \frac{2(\gamma - 1)}{2\gamma - 1} \quad (2)$$

で与えられる。上記は断熱変化を仮定した場合であるが、直感的にも下流に向かって u が増すにつれて外部磁場 B を単調減少させるべきであることと異論は無いだらう。(一次元的には、入り口から出口に向かって直線的に減少するような勾配磁場でも、最適解とほとんど効率の差は無いことが分かっている。) 詳細には、電離・ホール効果を考慮した 2 次元流れ場における最適な磁場形状の在り方について興味深いところであるが、窪田[26]の電磁流体コードと日大の最適化手法[27]をベースとして解くことが出来るだろうと思われる。

さて、最適な (又はそれに準ずる) 磁場形状が分かったとして、それを実機に適用する方法であるが、医療用 MRI の分野において 1980 年代に Target Field Method と云うものが確立されている[28]。(我が国では筑波大の巨瀬らがこのテーマに詳しい[29][30].) これは欲しい磁場形状と電流回路が作る磁場形状をそれぞれフーリエ表記し比較して解くことにより任意の勾配磁場形状を空間に実現する解析手法である。無論、解として得られる電

流経路は複雑であり、実装が難しいケースも多いが、そこは工学的に解決すべき課題である。実際にこのようにして作成されたコイルの例を図2に示す。

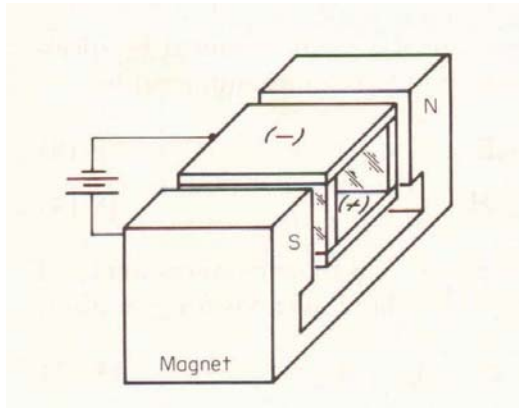


図1 外部磁場印加矩形MPDの概念図

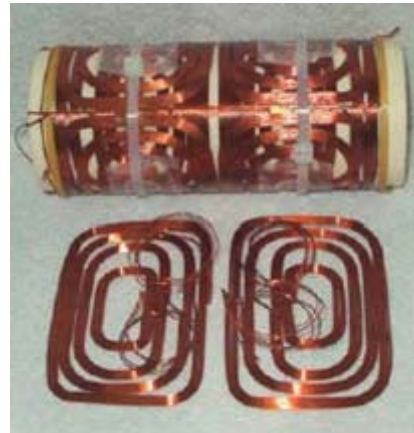


図2 勾配コイルの実装例 (筑波大学) [30]

2.2. 臨界作動点の回避

2.2.1. Alfvén 速度の回避

MPD スラスタにおいてはある程度以上に放電電流を増やすと、激しい電圧振動（この時、激しい電極損耗を伴うことが多い）が起こり、安定した運転が続行不能となることが知られている。これが起こる点を臨界作動点と呼ぶ。臨界作動点の原因については2つの説があり、一つは Alfvén 臨界速度による作動限界、もう一つは電荷担体の欠乏による作動限界である。

Alfvén 臨界速度[31][18]は、元々は磁場を横切るプラズマ旋回流の実験によって確認された[32]現象であり、単一組成のガスで構成されるプラズマ荷電粒子と背景中性粒子との平均相対運動エネルギーがそのガス種の電離エネルギーを超えると、急激に電離が進み、電離が100%となるまでプラズマはそれ以上の速度には加速され得ないと云うものである。即ち、その臨界速度は

$$u_e = \sqrt{\frac{eV_i}{2}} \quad (3)$$

で与えられる。励起エネルギーなどが無視されている、累積電離を考慮していない、十分に運動エネルギーが中性ガスに伝達されるには上記よりもずっと大きな相対運動エネルギーが必要などと云った反論もあるが[31]、上記の関係は実験結果をよく説明しており、この閾値を超えると巨視的な擾乱が成長するものと理解されている。

この臨界速度は例えばアルゴンでは約8.7km/sとなり、比推力に換算して約900秒以上の動作は出来ないことを意味しているが、MPD スラスタではこれが成立する例と、成立しない例がそれぞれ報告されている。Stuttgart 大の定常実験ではこの値を超えると放電電圧は急上昇し、安定な作動が不可能になる[15]。一方で、ISAS や Princeton 大の準定常実験[16][3]ではこの値の2～3倍のところまで漸く電圧振動が起こると云った具合である。

Alfvén 速度の前提は背景に中性粒子がふんだんに存在することであるから、チャンネル長さの範囲で衝突がほとんど起こらないほど希薄だったり、或いは電離度が100%となって中性粒子との相互干渉が無いような場合には上記の臨界速度を超えることも有り得る。実際、ホールスラスタでは流体近似出来ないほどにプラズマが薄く、また出口においてはほぼ完全電離しているため、キセノンを用いて Isp=2000 秒程度の作動も可能である。高比推力作動のためには粒子衝突に頼らない作動条件を取るべきであると云える。

もう一つの有力な原因は電荷担体の欠乏によるものである。準定常スラスタで通常観測される電圧振動は陽極

のエロージョンを伴うため、ほぼこちらに起因すると考えられる。MPD は基本的に定電流回路であるが、プラズマ中電荷担体は陽極付近で不足しやすく、この時陽極面には面電荷分布が形成され、局所的に大きな降下電圧を生じて荷電粒子を引きこもうとする。この時陽極に達するアークは局所スポットを作って陽極材料を熔融・蒸発させるため、陽極蒸気が電荷担体の不足を緩和し、再び陽極降下電圧は小さくなる。陽極材料の蒸発が止まり、電荷担体が不足すると再び陽極降下が増大する、と云った繰り返して放電電圧の振動が起こる。これらのプロセスについては[33][34]に詳しい。

自己誘起磁場では大推力・高効率を狙って J を増すと上記の電荷担体欠乏の問題に必ず出くわすが、外部磁場印加型では、放電電流 J を低く抑え外部磁場強度のみ増すことで電荷担体の欠乏を回避する可能性がある。無論、強い磁場をかけることで電荷担体の電極間方向への移動は不自由となるため、何らかの形での限界は存在すると思われるが、このような外部磁場印加における作動限界について言及した例はごく少ない。Tikhonov らは同軸外部磁場印加型スラスタを用いた実験データから、帰納的に作動限界

$$J_{cr} \propto \frac{1}{B} \quad (4)$$

が得られたと報告している[35]が、その理論的背景や、実験データの詳細は不明瞭である。先に述べたホールスラスタでも、磁場を強くしてゆくと電離不安定に起因する電流振動が起こるが[36]、少なくとも振動に至らない範囲で実用的な効率での運転が可能であり、外部磁場印加 MPD でも何らかの作動限界は必ず存在すると思われるが、その範囲内で低電力・高効率の作動を達成できる可能性があるのではないかと考えている。

3. 実機的设计

3.1. 外部磁場印加型 2 次元 MPD スラスタヘッド

上記のような経緯を踏まえて、直交外部磁場型 2 次元 MPD アークジェットを新しく設計した。(ここで、矩形型のことを 2 次元と呼ぶのは、旧宇宙科学研究所にて研究されていた内部観測用矩形型 MPD を通称 2 次元 MPD と呼んでいたことに因む。)

設計図及び実機写真をそれぞれ図 3、図 4 に示す。電極は幅方向の放電均一性を維持するため、3ch の棒状陽極・陰極対から成る。陽極はタングステン又は磷青銅製、陰極は 2% トリタンである。銅製陽極は電極損耗の有無の確認およびその量を計測する際に都合が良いが、通常の実運用では損耗の少ないタングステンを用いる予定である。側壁には石英ガラスを、インシュレーターにはホトパールを用いた。

外部コイルは、いずれは 2 節に記したような勾配磁場を作るようなコイルを実装する予定であるが、当面は均一磁場を実現する Helmholtz コイルで実験を行う。後述するように、コイル電源と主放電のための電源を共有するのでコイルのインダクタンスがあまり大きくなると、主放電電流波形に対して外部印加磁場の波形が遅延する。このため、インダクタンスはせいぜい数 μH に抑える必要があり、必然的に少ないターン数、大電流で強磁場を実現する方向になる。準定常作動なので熱耐性にはそれほど注意する必要はないが、大電流による反発があるため、構造強度には注意を払う必要がある。4mm 径のケーブルを左右 9 ターン巻くことでうまく動作することを確認した。コイル電流と中心磁場強度の解析解を図 5 に示す。放電室チャンネル内 ($-20\text{mm} < x < 20\text{mm}$ の範囲) で平坦な磁束密度が印加されることが分かる。設計上、5kA のコイル電流で 1T 程度の磁束密度を生成可能であり、最大では 2T 以上の印加も可能である。

上記のようなセッティングはあくまで、低電流×強磁場による電荷担体の不足を回避した高効率作動が成立するかどうかを追求するための実験室環境に過ぎず、最終的には定常・多数回ターンの磁気回路を適用するのが望ましいだろう。軽量化が第一の指標ではあるが、強力な磁場を得るためには宇宙用超伝導コイル等の実装も考慮に入れておくべきである。

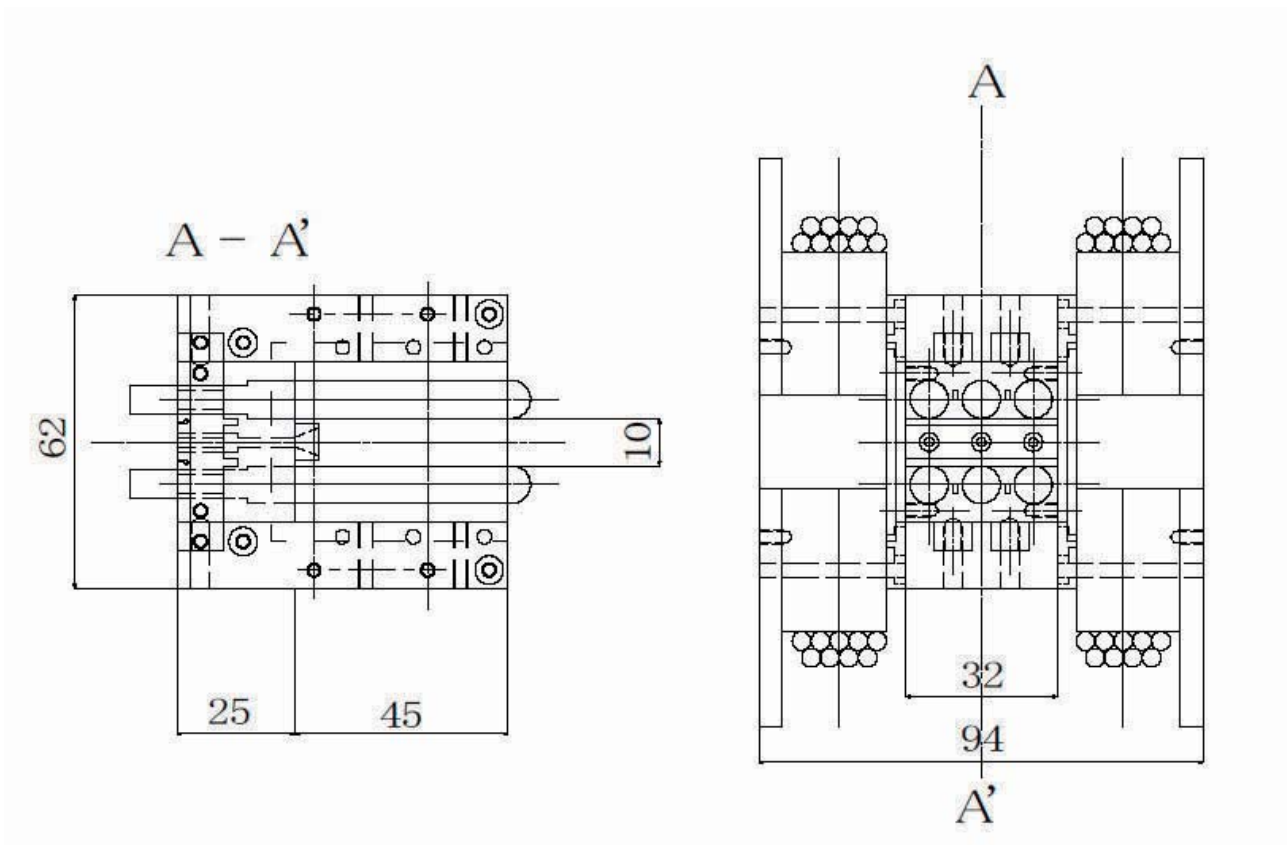


図3 直交外部磁場印加2次元MPD組立図 (9ターン Helmholtz コイル実装時)



図4 直交外部磁場印加2次元MPD実機写真 (9ターン Helmholtz コイル実装時)

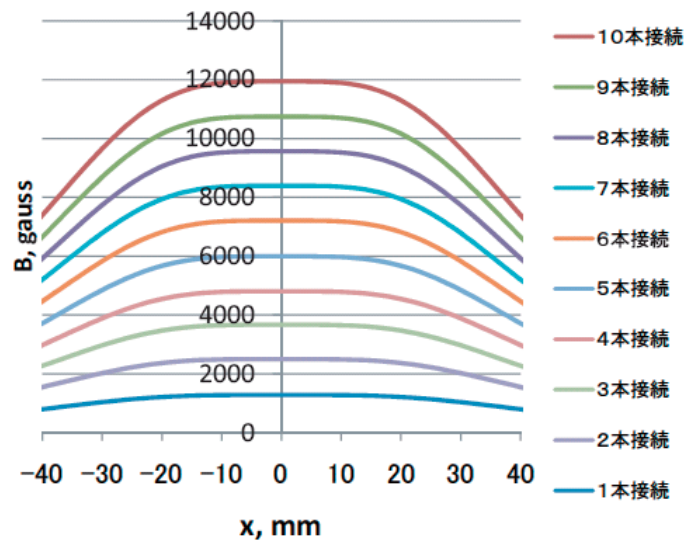


図5 Helmholtz コイルによって放電室幅方向に生成される磁場強度分布 (2kV 充電)
 $x=\pm 20\text{mm}$ までが放電室領域となる。

3.2. 電源部

外部磁場印加型の場合、放電部とは別にコイルのための電源を用意するのが最善である。或いは大阪大学のように、放電部とコイルを直列につなぐ手法もある。しかしながら、今回は1式の Pulse Forming Network にて3chの放電部と外部コイルに電流を分配する設計とした。概要を図6に示す。PFNより供給される電流は、分割抵抗 $R1\sim R10$ (0.5Ω)及び $R11\sim R13$ (3Ω)に抵抗の逆数比で分配される。 $R1\sim R10$ から伸びるケーブルは外部コイルへつなぎこむか、或いは短絡しPFNへと帰るかを選択出来る。これによって主放電電流 I を一定に保ちつつ、外部コイル電流を10段階に変化させることが可能である。例えばPFNから 10.5kA の電流が供給された時、各チャンネルには 166A (3chで 500A)、コイルには $1\text{kA}\sim 10\text{kA}$ までの電流を選択的に流すことが出来る。コイル電流が流れた際に両端にかかる 500V が放電部(CH1~CH3のA-K間)の絶縁破壊を起こす。絶縁破壊電圧が不足する場合には $R1\sim R5$ までのみ使用し、 $R6\sim R10$ を回路図から省けば、約 1kV の両端電圧を得る。代わりにコイルに流せる電流は5段階となる。このような回路で得られる主放電波形とコイル電流波形をPSpiceで解いたものを図7に示す。コイル電流波形は主放電に対してごく僅かに遅れ、その間のみ主放電チャンネルに大きな電流が流れるが、現実の回路では主放電チャンネルは絶縁破壊の過程があり、コイル電流が先に流れるため、このようなオーバーシュートはやや緩和されると思われる。

実際に製作された配電盤を図8に示す。コイル電流 or 短絡のつなぎかえが煩雑となるため、Multi-Contact社の大電流コネクタを用いた。以上の配電盤設計はプラズマのインピーダンスが分割抵抗 $R11\sim R13$ (3Ω)に対して十分に小さいことを前提としていることを予め断わっておく。

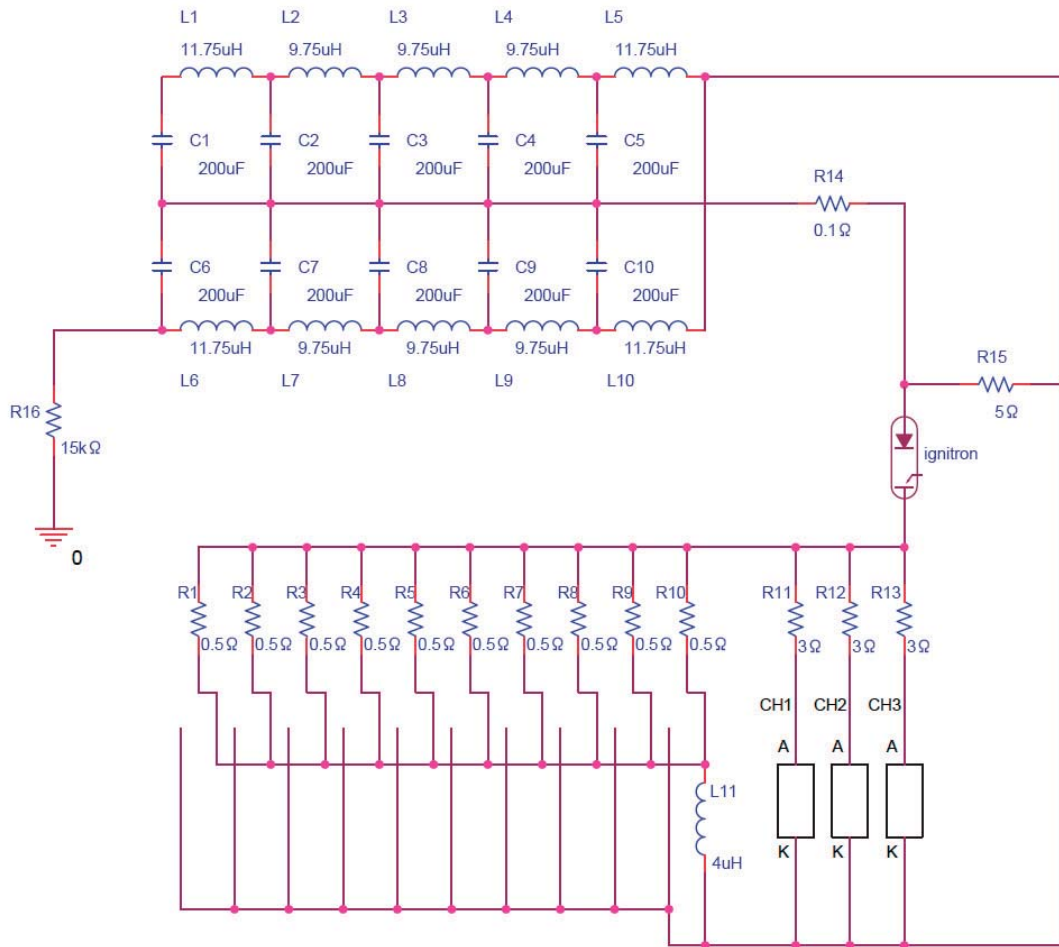


図6 直交外部磁場印加2次元MPD用電源部 (PFN) と配電盤回路図

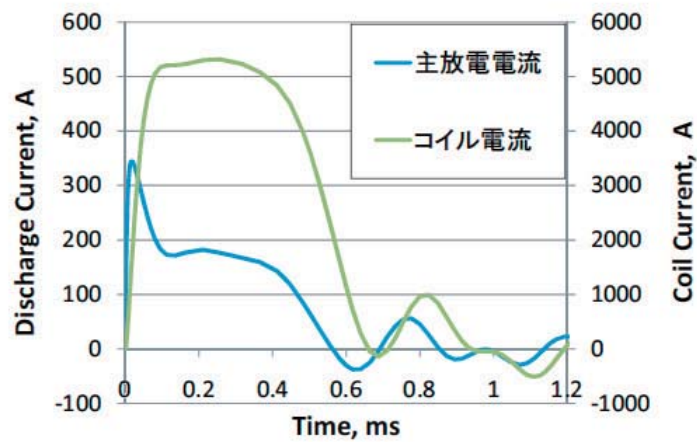


図7 PSpice を用いて解いた PFN1.5kV 充電時の主放電電流 (左縦軸, 1ch 当たり) 及びコイル電流 (右縦軸).



図8 製作した配電盤

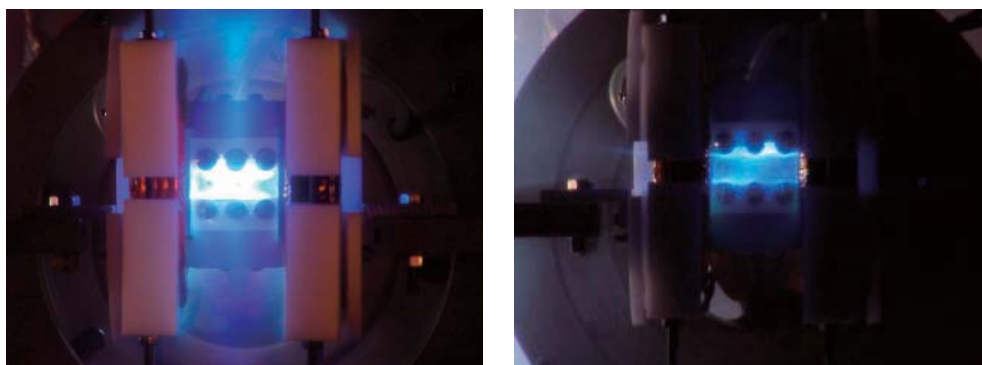


図9 実機放電写真（但し、上3本が陰極、下3本が陽極である）。主放電電流 250A/ch, コイル印加磁場 約1T, 流量 左: 2.0g/s 右: 0.2g/s, 推進剤種: アルゴン

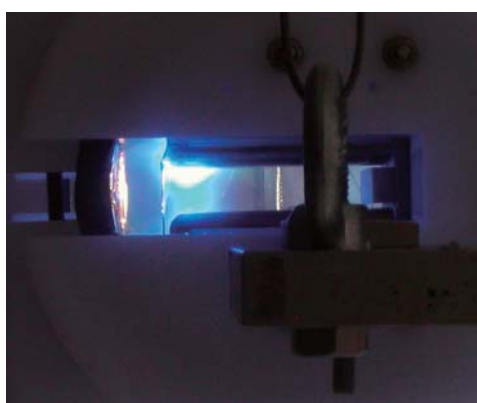


図10 実機放電写真（但し、上3本が陰極、下3本が陽極である）。主放電電流 350A/ch, コイル印加磁場 約1.6T, 流量 0.2g/s, 推進剤種: アルゴン

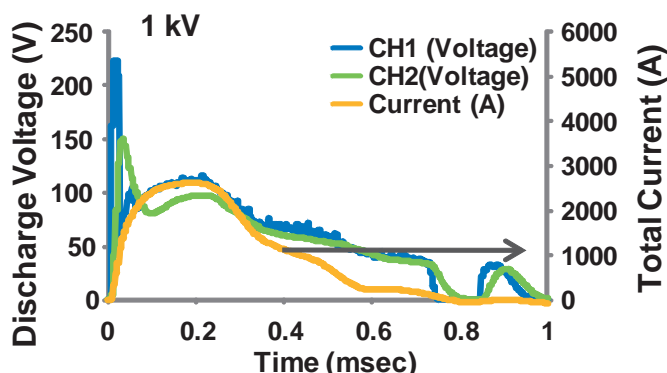


図 1.1 1kV 充電時の総電流・電圧波形 (アルゴン, 0.2g/s)
 なお, CH1・2 はそれぞれ左・中央の電極対

4. 実機の運転

正面及び側面からの放電写真を図 9, 図 10 に示す. 電力レンジを考えると, 最終的には流量が少ない状態 (数十 mg/s) での作動が目標であるが, 差し当たって着火特性を調べるため, 流量 2.0g/s にて放電を行った (図 9 左). 3ch ともほぼ均等に着火していることが分かる. また, 中央のチャンネルから上下にプラズマ発光が認められる. 発光状態から云えることはごく定性的な推測に留まるが, Helmholtz コイルによって作られた磁場の弱いところへプラズマが流れてゆく傾向があると云えるだろう. 流量を減らした場合 (図 9 右) には陰極表面及び陽極表面のごく薄い層でのみ発光が見られ, 電極間領域ではごく発光が弱く, バックプレートまでが透けて見えるようになる. 印加磁場が強い (1.6T) 時の放電を側面から見ると (図 10), 陰極でもごく先端部でのみ発光があることが分かる. 即ち, 磁場強度がかなり強い場合には奥行き方向 50mm の平行型放電室のごく先端のみで放電が起こっている可能性もあり, 今後 3 次元的な磁場の分布と正味のアーク放電領域を詳細に追求する必要がある.

図 1.1 はロゴスキーコイルとフォトカプラ絶縁を介した並列抵抗によって実測された 1kV 充電時の総電流 (右軸), 放電電圧波形 (左軸) である. 本来, 総放電電流のみ測定すれば放電電流とコイル電流は各分割抵抗の逆数比で決定されるのであるが, この仮定は 3 節で述べたように, アークインピーダンスがごく小さい場合にのみ成立する. 実際にはアークインピーダンス (放電電圧 / 放電電流) は予想以上に大きく, 強磁場をかけると 1Ω 程度に達することもあり, 分割抵抗 3Ω に対して小さいとは云えないことが分かった. 自己誘起磁場型 MPD のアークインピーダンスは高々 10mΩ 程度であると云うのが一般的であり, 同軸外部磁場型でもこれほどのアークインピーダンスは報告されていない [18]. 本実験では直交外部磁場の印加によって強い $u \times B$ 逆起電力がかかっていることが推測される.

5. まとめ

MPD スラスタを含む電磁加速推進器は, 本質的に軽量・コンパクトであり, 大電力電気推進に適した候補である. 自己誘起磁場型 MPD は数百 kW 以上で真価を発揮するが外部磁場印加型は数十 kW クラスから効率的な作動を実現出来る可能性を秘めている. また, 2 次元 (矩形) 型は同軸型に比べて外部磁場の印加パターンへの自由度が高く, 興味深い. 上記のような理由から外部磁場印加矩形 MPD の研究開発を開始した. 内包するテーマとして,

- ・ 外部磁場印加パターンの最適化とその実装 (Target Field Method によるコイル設計)
- ・ 電荷担体欠乏による作動限界を回避した高比推力での作動 (低電流×強外部磁場での作動)

に取り組む予定である. 実機を製作し, 準定常での動作を確認した.

参考文献

- [1] M. Martinez-Sanchez, “Spacecraft Electric Propulsion – An Overview”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.14, No.5, pp. 688-699, 1998
- [2] I. Funaki, et. al., “Electrode Configuration Effect on the Performance of a Two-Dimensional Magnetoplasmadynamic Arcjet”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.14, No.6, pp. 1043-1048, 1998
- [3] E. Y. Choueiri, et. al., “Quasi-Steady Magnetoplasmadynamic Thruster Performance Database”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.17, No.5, pp. 967-976, 2001
- [4] 田中孝治, 佐々木進, 川口淳一郎, 今泉充, “薄膜太陽電池の開發現状と計画への適用性について”, 第4回宇宙科学シンポジウム講演集, 2004
- [5] M. J. O’Neill, et. al., “Recent Technology Advances for the Stretched Lens Array (SLA), a Space Solar Array Offering State of the Art Performance at Low Cost and Ultra-Light Mass”, 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005
- [6] M. Piszczor, et. al., “The Stretched Lens Array SquareRigger (SLASR) for Space Power” AIAA Paper 2006-4137, 2006
- [7] D. M. Goebel, et. al., “Variable Specific Impulse High Power Ion Thruster” AIAA Paper 2005-4246, 2005
- [8] D. Manzella, et. al. , “Laboratory Model 50 kW Hall Thruster” AIAA Paper 2002-3676, 2002
- [9] S. R. Oleson, et. al., “The Electric Propulsion Segment of Prometheus 1”, AIAA Paper 2005-3888, 2005
- [10] R. Spores, et. al., “A Solar Electric Propulsion Cargo Vehicle to Support NASA Lunar Exploration Program”, IEPC Paper 2005-320, 2005
- [11] D. T. Jacobson, et. al., “An Overview of Hall Thruster Development at NASA’s John H. Glenn Research Center”, AIAA Paper 2005-4242, 2005
- [12] E. Stuhlinger, *Ion Propulsion for Space Flight*, McGraw-Hill, New York, 1964
- [13] K. Toki, “On-Orbit Demonstration of a Pulsed Self-Field Magnetoplasmadynamic Thruster System”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.16, No.5, pp. 880-886, 2000
- [14] 國中 均, “電気推進への宿題 (前半)”, 日本航空宇宙学会誌, Vol.53, No.612, pp.1-6, 2005
- [15] T. Wegmann, et. al. “Steady State High Power MPD Thrusters”, AIAA Paper 90-2555, 1990
- [16] D. Nakata, K. Toki, et. al. “Recent Study for Electrode Configuration and Material Improvement in an MPD Thruster”, AIAA Paper 2007-5279
- [17] K. Toki, et. al. “Multichannel Two-Dimensional Magnetoplasmadynamic Arcjet”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.8, No.1, pp. 93-97, 1992
- [18] 栗木恭一, 荒川義博, 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, 2003
- [19] A. Sasoh, Y. Arakawa, “Electromagnetic Effects in an Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thruster”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.8, No.1, pp. 98-102, 1992
- [20] H. Tahara, et. al. “Effects of Applied Magnetic Fields on Performance of a Quasisteady Magnetoplasmadynamic Arc”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.11, No.2, pp. 337-342, 1995
- [21] R. Takaya “Experimental Study of an Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thruster”, 26th ISTS Paper 2008-s-38, 2008

- [22] A. Sasoh, “Thrust Formula for Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thrusters Derived from Energy Conservation Equation”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.11, No.2, pp. 351-356, 1995
- [23] V. H. Blackman, et. al., “Experimental Performance of a Crossed-Field Accelerator” *AIAA Journal*, Vol.1, No.9, pp. 2047-2052, 1963
- [24] M. Richard, et. al. , “Investigation of the Phenomena in Crossed-Field Plasma Accelerators”, AIAA Paper 63-378, 1963
- [25] R. G. Jahn *Physics of Electric Propulsion* Mc-GRAW-HILL, 1968
- [26] K. Kubota, et. al. “Numerical Study of Electrode Geometry Effects on Flowfield in Two-Dimensional MPD Thrusters”, IEPC Paper 2007-87, 2007
- [27] 永尾将郎, 中根昌克, 他., “自己誘起磁場型 MPD スラスタのノズル形状最適化” 第 52 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 講演番号 2G10, pp.1396-1401, 2008
- [28] R. Turner, et. al. “A Target Field Approach to optimal coil design”, *Journal of Applied Physics*, Vol.19, pp.147-151, 1986
- [29] 巨瀬勝美 編著, コンパクト MRI, 共立出版, 2004
- [30] MR I のすべて : <http://blog.goo.ne.jp/kose1953>
- [31] H. Alfvén, “Collision between a Nonionized Gas and a Magnetized Plasma”, *Reviews of Modern Physics*, Vol.32 No.4, pp.710-713, 1960
- [32] U. V. Fahleson, “Experiments with Plasma Moving through Neutral Gas”, *The Physics of Fluids*, Vol.4, No.1, 1961
- [33] L. Uribarri, E. Y. Choueiri., “The Onset of Voltage Hash and its Relationship to Anode Spots in Magnetoplasmadynamic Thrusters”, IEPC Paper 2005-084, 2005
- [34] L. Uribarri, E. Y. Choueiri “Relationship between Anode Spots and Onset Voltage Hash in Magnetoplasmadynamic Thrusters”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.24, No.3, pp. 571-577, 2008
- [35] V. B. Tikhonov, et. al. , “Own Magnetic Field Impact on MPD Thrusters Performance with External Magnetic Field”, IEPC Paper 99-176, 1999
- [36] 民田太郎, 他, “ホールスラスタにおける低周波振動現象の指標パラメータの研究” 第 50 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 講演番号 2F06, pp.1053-1058, 2007

※ 参考文献中 IEPC Paper は International Electric Propulsion Conference 講演集を意味する.