

ミリ波放電を使った新しい宇宙推進システム New Space Propulsion System using Millimeter-wave Discharge

小紫 公也、福成 雅史
Kimiya Komurasaki, Masafumi Fukunari

東京大学
The University of Tokyo

1. はじめに

従来の自動車や航空宇宙機は、自身に燃料を搭載する必要があり、積載可能な貨物はその分少なくなる。航続距離や加速量と貨物量はトレードオフの関係にあり、最も条件の厳しい静止軌道への打ち上げではロケット自重の 1%程度の貨物しか運ぶことができない。そこで、走行中や飛行中に無線で推進エネルギーを供給しようという試みがある。電磁ビームロケットは、地上からレーザーやマイクロ波といった電磁波により飛行中のロケットにエネルギー供給するもので、燃料を搭載せずに済み、その分貨物を積載できる。

ロケットの駆動エネルギー源として、熱核融合炉におけるプラズマ加熱・電流駆動用が開発が進むジャイロトロンを利用する点が従来のレーザーを使った電磁ビームロケットと異なる点であり、ビーム源の大電力高効率化・長時間運転・クラスター化が短期的に実現できるため、現在のところ技術的および経済的実現可能性がより高い¹⁻³⁾。

2. 超音速で伸展するミリ波放電が支持するデトネーション現象

レーザーやマイクロ波といった高強度の電磁ビームを集光すると、焦点付近で絶縁破壊が起き、そこから放電が衝撃波を伴いながらビームを遡って伸展する。この際、大気は放電の先端で急速に加熱され、昇圧する。この現象を電

磁波が支持するデトネーションと呼び、電磁エネルギーは直接気体の圧力に変換される。

この電磁波支持デトネーション現象が本推進システムの核であり、その電磁波の周波数や強度によって異なる放電特性が現れる。ミリ波で支持された放電の場合、図 2 に示すような微細なフィラメント構造が特徴的であり、放電がビーム源に向かって進展する速度は、レーザー放電に比べておよそ 2 桁低い入射電力密度の 10 GW/m^2 程度で、 2 km/s から 5 km/s の超音速進展が観測されている。これら放電伸展速度や放電構造に関しては、未だ不明なことも多く、まだ研究は始まったばかりである。

流体力学の分野においてデトネーションは、質量保存式、運動量保存式、単位質量あたりに加わる熱量を加えたエネルギー保存式と状態方程式による定常の加熱流れの式で解析される。燃焼による化学デトネーションでは、単位質量あたりに加わる熱量は、燃料の種類と当量比によって決まる定数となるため、変数は温度、圧力、密度、流速の 4 つとなり、方程式も 4 つあるので解析的に解くことができる。しかし電磁波によるデトネーションでは熱量は定数ではなく、電磁波の電力密度と電離波面の伝播速度で決定される。

デトネーションの状態は、流体の圧力を縦軸、比体積を横軸にとった p - v 線図上で、原点より伸びるレイリー線とユゴニオ断熱曲線により解析できる。上述のように電磁波支持デトネーションではユゴニオ断熱曲線が流速に対して



図 1 電磁ビームロケットのイメージ図



図 2 ミリ波放電に見られるフィラメント構造

一意に求められないので、電力密度を固定して、ある流速に対する解を、流速を変えながら p - v 線図にプロットするとユゴニオ断熱曲線のような曲線を得る(図3)。赤線が今回求めた、電磁波支持デトネーションのユゴニオ断熱曲線で、緑線が Raizer らの求めたユゴニオ断熱曲線である。流速を遅くするとレイリー線の傾きが下がり、ユゴニオ断熱曲線との交点が1つになる。この状態をチャップマン-ジュゲ状態(C-J 状態)と呼ぶ。この状態のデトネーションを C-J デトネーションと呼び、これは波の伝播速度が最も遅いデトネーションである。

レーザー・ミリ波放電は、共にその伸展速度やデトネーション構造の維持条件を理論的、解析的に求めることは未だできない。数値シミュレーションによって再現・予測する試みはあるが、それを検証するに足る十分な実験結果も無い。一方で、推進器設計においては、理論的に最適な放電伸展速度が存在すると予想されるため、放電現象に関する基礎的な研究が重要となっている。

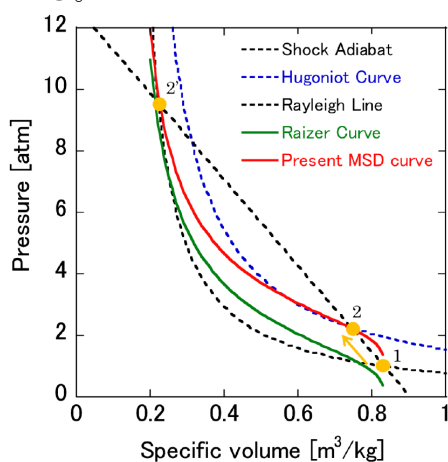


図3 電磁波支持デトネーションでのユゴニオ断熱曲線の p - v 線図。

3. ミリ波プラズマの数値シミュレーション

Bouef らはフィラメント状に伸展するミリ波プラズマの数値計算モデルを提案し、実験結果を良く一致することを示した⁴⁾。Bouef らモデルを用いた解析結果によると、集光点近くで絶縁破壊により発生したプラズマの電離波面はビームの電界方向に伸びフィラメントを形成しながらビームに遡って伝播する。さらに成長したプラズマによって反射したミリ波と入射波が干渉し定在波が形成され、その腹における電界強度が放電の電離閾値電界 E_c を超えるこ

とで、そこに新たなフィラメントが発生する。ミリ波誘起放電で重要なのが高電界場での大気電離モデルと輸送係数(電子拡散、輻射輸送)である。

マイクロ波ロケットに適用される圧力変換サイクルに適した(C-J 速度に近い)爆轟波を駆動する電力領域では、定在波位置での電界強度が E_c を超えず、測定された電離波面伝播速度(爆轟波伝播速度と等しい)を再現するには、 E_c の値を人工的に小さくする必要があった。本研究でも未だこの問題は解決していないが、伝播速度が実験と等しくなるように E_c を決定すると、実験で観測された粒状のプラズマのピッチが入射ミリ波の波長によって決定されることが確認できた(図4)。今後はこの結果を用いてピッチサイズの波長依存性、および伝播速度の変化を明らかにしていく。

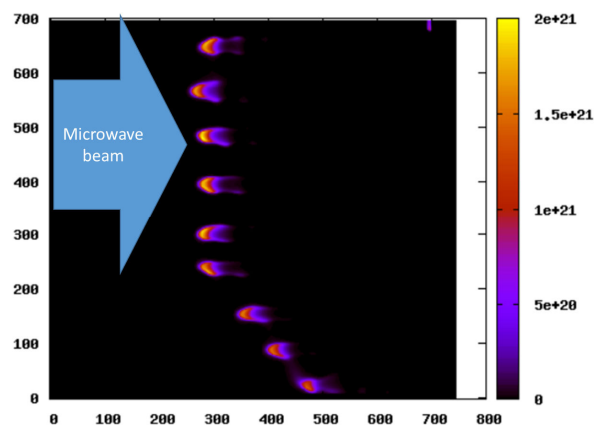


図4 電離波面の電子密度の計算結果。

4. まとめ

レーザー・ミリ波放電は、共にその伸展速度やデトネーション構造の維持条件を理論的、解析的に求めることは未だできない。数値シミュレーションによって再現・予測する試みはあるが、それを検証するに足る十分な実験結果も無い。一方で、推進器設計においては、理論的に最適な放電伸展速度が存在すると予想され、プラズマを介する電磁ロケットにおいて、放電現象に関する基礎的な研究が重要となっている。

参考文献

- [1] A. Kantrowitz, Astronaut. Aeronaut, Vol. 10, No. 5, 74(1972)
- [2] Y. Oda, T. Shibata, K. Komurasaki, K. Takahashi, et al., J. Propulsion and Power, Vol. 25, No. 1, 118(2009)
- [3] M. Fukunari, R. Komatsu, A. Arnault, et al., Vacuum, Vol. 88, 155(2013)
- [4] Bouef, B. Chaudhury and G.Q. Zhu, Phys. Rev. Lett. Vol. 104, 015002 (2010)