

ヘリコンスラストの推進機構

Propulsive mechanisms of a magnetic nozzle helicon thruster

高橋和貴

Kazunori TAKAHASHI

東北大院工

Dept. Electrical Eng., Tohoku Univ.

序論

近年、イオンエンジンやホールスラスト等の研究開発が進展し、多くのミッションで電気推進技術が使用されるようになってきた。また従来の電気推進機はプラズマ生成・加速に電極を用いた構造を有しているため、イオン衝撃や熱負荷による電極損傷が大きな課題となっている。そこで近年、VASIMR (Variable specific impulse magnetoplasma rocket) やヘリコンスラスト、電子サイクロトロン共鳴スラスト等の、磁気ノズルを有した推進機開発が行われている。本講演では、ヘリコンプラズマスラストの推力発生機構に関する研究について、筆者らのこれまでの研究を中心としてプラズマ荷電粒子の挙動および推力発生機構について報告する。また現在推進性能の改善を図っているため、その結果についても合わせて報告する。以上により磁気ノズルヘリコンスラストにおける外部磁場と高周波の役割について述べる。

磁気ノズル配置における静電イオン加速

図1のように磁気ノズルをヘリコンプラズマ源に印加した際に、自発的なダブルレイヤー軸方向電場が形成 (current-free double layer: CFDL) されることが多くの室内実験で観測されてきており、この自発的電場による静電イオン加速現象が確認されている[1]。またこの電位構造の高電位側および低電位側において電子エネルギー分布関数を計測したところ、上流部の低エネルギー電子は電位構造に捕捉され、高エネルギー電子のみが下流へと流入することが観測されている[2]。すなわち、下流域へと放出されるイオンと電子のフラックスが等しくなるように電位降下の値は自己調整される。この現象は、高周波プラズマの特徴である“current free”の条件と矛盾無く、推進機が帯電することなく動作可能であることを示唆している。ヘリコンスラストの推力計測は、筆者らが2011年に

行った実験が初であるが[3]、この実験で得られる推力は、上流域の電子圧力に相当することが示された。また上流部の電子エネルギー分布関数が粒子バランスにより決定されていることが示されたことを考慮すると[4]、CFDLのエネルギー源は生成部の電子が有する熱エネルギーであり、CFDLを介して最終的にはイオンのエネルギーへと変換されたと解釈することが出来る。つまり筆者らの現時点での理解では、静電的なイオン加速現象はプラズマに運動量を与えず、推進力へは寄与しない効果である。すなわち、ここでは高周波は電子へのエネルギー供給源、外部磁場は静電場形成のための条件となるが、推力は前者のみで決定される量となる。

磁気ノズル配置における電磁プラズマ加速

一方で、下流域の磁気ノズル中へとプラズマが流出した後は、磁気ノズル中の電子反磁性ドリフト電流と径方向磁場のローレンツ力で加速されることが見出され、その効果が推力の分解計測により確認されてきている[5]。この場合も外部からのエネルギーまたは運動量注入が無い場合、プラズマの運動量およびエネルギーは保存されるべきである。しかしこの加速が起こる際には推力の増加が起こる。これは電子反磁性電流が半径方向圧力に起因する電流であ

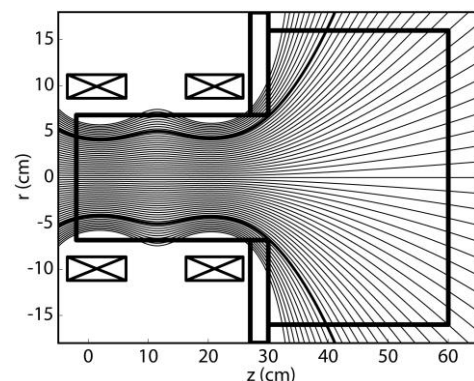


図 1. 典型的なヘリコンダブルレイヤー実験装置。

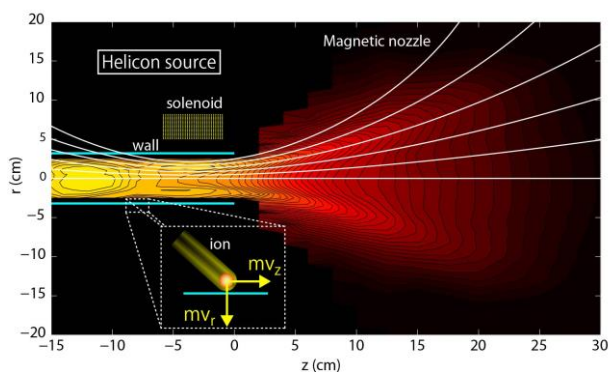


図 2. 軸方向運動量損失過程のイメージ図.

り、外部磁場との相互作用を介して軸方向への力へと変換されるためである。推力は軸方向のプラズマ運動量に相当するため、上記のメカニズムによって径方向の圧力が軸方向への運動量へと変換されると言い替えることが出来、磁気ノズルの役割としては運動量ベクトルの変換の役割であるといえる。ただしこの力はノズル中のプラズマ圧力分布が大きく影響するため、磁気ノズルからのプラズマの損失を抑止することで効果の増大が可能である[6]。プラズマ周方向電流が電子反磁性ドリフトに一致するかは議論が終結しておらず、現在東北大学にて詳細計測を実施している最中であり、その結果を参照されたい。いずれにせよ、磁気ノズル中のプラズマ加減速過程に加えて、静圧と動圧の和に相当するプラズマ運動量 (これはベクトル量である) の変換過程を理解し、性能改善へとフィードバックする必要がある。

壁面における軸方向運動量損失

流体モデルを用いたプラズマ生成解析では、軸方向速度の径方向勾配が小さいと仮定して、 r, z 方向の運動量方程式が簡易化される場合が多い。この項はスラストモデルにおいては、壁面へ損失する軸方向の運動量に相当する(図2挿入図)。近年の推力の分解計測技術により更に興味深い現象が観測されている。プラズマ生成部の上流域にて電場構造が形成され、イオンの軸方向加速が起こり得る条件では、壁面へ損失する軸方向運動量が増大することが観測され、筆者らは中性粒子枯渇に伴うプラズマ構造形成が大きく関係していると考えているが、詳細は不明である。定常的なプラズマ加速と運動量変換という一見単純な現象のように見えるが、磁気ノズル型のスラスト中では様々な現象が複雑に誘起され、直接推進性能へと影響を及ぼす。

したがって、これらの物理素過程を理解し、それを踏まえた性能改善法等を開発して行くことが、高性能推進機開発の近道である (パッと見は遠回りであるが…) と筆者は考えている。事実、上述の物理的知見を基盤としてスラストを設計・性能試験を実施したところ、現時点で最高性能である 約20mN/kW 程度の推力電力比が得られている[8]。ただし推進効率は10%程度にとどまっているため、今後更に改良が必要である。

ヘリコンスラスト開発に関する技術的要素

本講演で話題として取りあげたヘリコンスラストは、構造としては非常にシンプルなものであり、主な構成要素は下記のとおりである。(1)プラズマ源絶縁管, (2) アンテナ, (3) ソレノイドコイル + 直流電源, (4) マッチング回路, (5) 高周波電源, (6)ガス導入系 (マスフローコントローラ等)。ここで (3)のソレノイドコイルおよび直流電源の消費電力と重量が問題となるため、永久磁石を用いたプラズマ源開発および推進性能試験が実施されてきた[9]。

まとめ

ヘリコンスラストにおける高周波と磁場の役割、推力発生機構について概要を述べた。詳細は講演にて発表・議論する。

謝辞

本研究の共同研究者である、C. Charles教授、R.W. Boswell教授、A. Fruchtmann教授、T. Lafleur氏、藤原民也教授、安藤晃教授をはじめ、共に研究を進めてきた岩手大学、東北大学の学生および関係者に深く感謝する。

参考文献

- [1] C. Charles, Plasma Sources Sci. Technol., **16**, (2007) R1 and references therein.
- [2] K. Takahashi *et al.*, Phys. Plasmas, **14**, (2007), 114503.
- [3] K. Takahashi *et al.*, Appl. Phys. Lett., **98**, (2011) 141503.
- [4] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **107**, (2011), 035002.
- [5] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **107**, (2011), 235001.
- [6] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **110**, (2013), 195003.
- [7] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **114**, (2015), 195001.
- [8] K. Takahashi *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol., **24**, (2015), 055004.
- [9] K. Takahashi *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys., **46**, (2013), 352001.