

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	MPDスラスタの電磁流体・熱連成シミュレーション
Title(English)	Coupled Plasma Flow and Thermal Simulation of a Magnetoplasmadynamic Thruster
著者(和文)	川崎央
Author(English)	Akira Kawasaki
出典(和文)	学位:博士（工学）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10209号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:奥野 喜裕,堀岡 一彦,堀田 栄喜,長崎 孝夫,赤塚 洋
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10209号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

近年の深宇宙ミッションの大規模化に伴い、将来的には宇宙機の主推進としての電気推進の更なる大型化が見込まれるが、その様な状況下において、将来技術の1つとして、電気推進の一種であるMPD (magnetoplasma-dynamic) スラスターの開発研究が活発に継続してきた。本研究では、大電力作動の観点から特に定常作動自己誘起磁場型のMPDスラスターに着目した。本スラスターは、通常、ノズル状陽極および棒状陰極を同軸配置し、その間に大電流放電を生じさせることで、主としてLorentz力により推力を発生させる。この様な作動原理に起因して、投入電力から推進仕事への十分に高い変換効率と、宇宙空間での作動を意図した実用的な熱設計とを両立させる最適設計が実用化の上での重要な課題となっている。そこで本研究においては、数値シミュレーションの活用による最適設計の加速を標榜した。推進性能の見積もりに必要な投入電力、およびスラスター構成要素の温度分布の見積もりに必要な壁面熱流束に関する確度の高い予測のためには、電極や壁近傍の静電シースを介しての荷電粒子束の評価が重要となることから、本研究においては、既往の数値モデルを統合、拡張することで、新たに静電シースを介した電磁流体・熱連成シミュレーションモデルを構築し、その妥当性を検証するとともに、スラスターの設計指針の確立へ向けた検討へ応用した。

第2章においては、静電シースを介した電磁流体・熱連成シミュレーションのモデルが説明される。モデルは、スラスター放電室のバルクプラズマ領域、電極領域、そしてそれらをつなぐ静電シース領域に分けて構築され、互いが互いの境界条件を与えることにより、整合的に統合している。静電シースは、無衝突平面シースモデルを基本とし、陰極シースに関しては熱電子放出を考慮した。特に、バルクプラズマと静電シースの境界（シース端）では、そこでの荷電粒子束、およびそれから決まる熱流束ならびに電位を与える点が重要である。

第3章においては、陰極に既往実験で計測された温度分布を与えて、プラズマ流れと静電シースのみが連成したシミュレーションを行い、実験結果との比較からモデルの妥当性を検討している。加えて、境界条件としてのシースモデルの適用の有無、および放電電流増加のプラズマ諸量や放電構造に与える影響を検討している。その結果、静電シースの存在により電極近傍でイオン数密度が低下し、そのことがHallパラメータを増加させ、陽極出口端への電流集中を助長すること、また陰極では概ねその温度分布に従って電流集中が生じることが分かった。またシースモデルを連成することで、これまで実験的な経験値が仮定されることが多かったシース電圧や電極への熱流束に関して、数値シミュレーション上で実験と整合的な見積もりを実現した。

第4章においては、陰極根元温度のみに仮定を与えた陰極熱モデルを考慮した完全な連成シミュレーションを行った。陰極に実測された温度分布を与えた第3章での結果と比較すると、わずかに実験結果との差異は大きくなるものの、ここでも実験との概ねの整合が確認された。放電電流を増加させると、陰極先端では電流密度や壁面熱流束は概ね増加せずに、放電の集中領域や壁温の高い領域が陰極根元方向に広がること、そこでの電流は主に陰極からの熱電子放出が担う一方で、熱流束は陰極へのイオン束が担うことが示唆された。また、陰極温度分布は、主に熱負荷と放射による放熱のバランスで決まることが示唆された。これらのこととは、電磁流体现象と熱現象を自己無撞着に評価できる電磁流体・熱連成シミュレーションにより初めて得られた結果である。

第5章においては、実用MPDスラスターの熱設計に向けた基礎的な検討を行った。ヒートパイプを利用した100 kW級の放射冷却型スラスターにおいて、陰極の半径や長さ、陰極根元温度が推進性能および熱的特性に与える影響について検討した。その結果、陰極を細くすると推進性能は向上し、長くすると陰極ラディエータによる冷却量を減少させるが、極端に細い場合はジュール熱による加熱が、また極端に長い場合は陽極端への電流集中が懸念されること、また陰極根元温度を低く設定することは、陰極の最高温度の低下には繋がらない上に陰極ラディエータによる冷却量を増加させることができることが示唆され、電極の設計における留意点が明らかとなった。

第6章においては、以上を総括するとともに、今後の課題について述べた。