

ROSEリポジトリいばらき（茨城大学学術情報リポジトリ）

Title	大気圧ミリ波放電時のプラズマ・衝撃波伝播構造制御とそのマイクロ波ロケットへの応用
Author(s)	山口, 敏和
Citation	
Issue Date	2019-03-26
URL	http://hdl.handle.net/10109/14157
Rights	

このリポジトリに収録されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作権者に帰属します。引用、転載、複製等される場合は、著作権法を遵守してください。

お問合せ先

茨城大学学術企画部学術情報課（図書館） 情報支援係
<http://www.lib.ibaraki.ac.jp/toiawase/toiawase.html>

氏名	山口 敏和		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	乙博理工第 73 号		
学位授与年月日	平成 31 年 3 月 26 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
学位論文題目	大気圧ミリ波放電時のプラズマ・衝撃波伝播構造制御とそのマイクロ波ロケットへの応用		
審査会	主査 池畑 隆	委員 高妻 孝光	
	委員 佐藤 直幸	委員 村上 元	委員 小柴 公也

論文内容の要旨

宇宙への大量物資輸送が必要となる時代を控え、地上から宇宙への輸送コストの大幅低減は宇宙開発における最重要課題の一つである。物資輸送に特化することを念頭に置けば、高価な再使用部分と安価な使い捨て部分とを組み合わせたシステムが有望視される。「マイクロ波ロケット」は、地上からミリ波ビームで供給されたエネルギーを推進機内での放電現象を介して高圧ジェットへと変換し推進力を得るもので、周辺大気を吸い込み推進剤とし、デトネーション現象により高圧ジェットを生み出す。高価な再使用部分はメンテナンス容易な地上設備であるビーム源に限られ、機体内部にエネルギー源を積まないことおよびデトネーション現象によりポンプ機構を用いずに昇圧することにより、使い捨て部分である機体を大幅に簡素軽量化して安価にすることが可能である。ビームに用いるミリ波は、電磁波の中で大電力ビーム発振技術がジャイロトロンにより既に開発されている点で実現性が高い。

マイクロ波ロケットの研究では、原理実証や内部物理の解明が試みられてきたが、実用化まで見据えた研究開発には至っていないことから、必要な要素研究を通して、鍵となる技術に関わる物理を解明し、実用化に向けた道筋をつけることが重要である。地上から供給される大電力ミリ波のエネルギーは、大気中を伝搬し、推進機内でのビーム集光で生じる放電によって流体のエンタルピーへと変換される。放電時に生じる衝撃波とプラズマとの相互作用がエネルギー変換効率を決めると考えられるため、ミリ波ビームの照射条件および周辺大気圧力を変えて実験を行い、衝撃波の圧力とプラズマの発光を計測して現象をとらえ、推進性能を向上させる指針を得ることを研究目的とした。

マイクロ波ロケットの推進性能を確認するために、繰り返しパルス作動による垂直打ち上げ実験を行い、100 g 級のモデルロケットに対して、発振周波数 170 GHz のミリ波ビームをピーク電力 600 kW、繰り返し周波数 100 Hz で照射し、1.2 m の飛翔を確認した。

回折効果によるビーム拡散への対策技術として、長距離ミリ波ビーム伝送系を設計し、推力生成実験を行い、4 m のビーム伝送技術を確立した。

ミリ波発振源であるジャイロトロン¹⁾の駆動電源を改良して実験を行い、ピーク電力 570 kW、パルス繰り返し周波数 200 Hz のビームを 3 発照射し、平均推力 30 N、推力電力比 330 N/MW を記録した。

飛行高度によって大気圧が変化することを想定し、推進器周辺の圧力を大気圧から 10 kPa まで減圧した実験を行った。放電時のプラズマ形状を観察した結果、0.3 気圧より高圧かつ高電力密度の条件下ではフィラメント状構造が形成され、300 N/MW 程度の高い推力電力比が計測された。一方で、0.3 気圧より低圧もしくは低電力密度の条件下では空間に広がったプラズマが形成され、100 N/MW 程度の低い推力電力比が計測された。このことから、フィラメント状構造と推進性能との関係性が示唆された。

大気圧ミリ波放電に見られるフィラメント状の伝播構造とマイクロ波ロケットの推進性能との関係を調べるため、位相補正鏡を用いて 170 GHz ミリ波のビームプロファイルを変換して実験を行った。局所電力密度が高いほど電離波面の伝播速度が速くなり、ビームプロファイルによってプラズマの形状が変化することが判明し、衝撃波背後のプラズマ領域を広くすることで推進性能を向上させられる可能性が示された。

高電力密度のビーム照射条件における現象を観察するために、ミリ波ビームの点状集光部付近をシャドウグラフ法により可視化した。集光点近傍の高電力密度領域では衝撃波面と電離波面とが一体となって伝播するデトネーション的伝播構造が観察され、集光点から離れた領域では衝撃波面から遅れて電離波面が伝播する分離伝播構造が観察された。電離波面の伝播速度が 800 m/s を超える高電力密度条件でデトネーション的伝播構造が形成されることが明らかとなり、この高電力密度条件下では推進器内部に維持されるプラトー圧が 0.9 気圧で飽和し、推力電力比の最適点が存在することが判明した。

照射ビームの周波数依存性を調べるため、周波数 28 GHz の大電力ミリ波ビームおよび波長 1,053 nm の高出力レーザーを照射した際の大気圧における放電現象を高速カメラにより観察した。28 GHz のミリ波放電においては、電磁波の電界方向と磁界方向とで異なる放電形状を形成することが示された。1,053 nm のレーザー放電においては、デトネーション的伝播構造から分離伝播構造へと遷移する現象を解析し、エネルギー変換効率について議論した。

上述の実験結果をもとに、推進性能についてまとめ、定式化を試みた。また、実験によって得られた知見から、ミラー搭載多気筒型の推進機を提案し、実用化に向けたモデルケースおよび開発ロードマップを示した。

本研究分野では、30 N の推力実証、衝撃波とプラズマの可視化、高電力密度およびビームプロファイルを変更した条件での実験は過去に例が無い。高電力密度条件において推進性能が頭打ちとなる飽和現象および、同条件において電離領域が衝撃波を追い越して伝播する過駆動現象は、本研究により新たに明らかになったものである。本研究で得られた成果からマイクロ波ロケットの性能向上を図ることが可能と考えられる。

論文審査の結果の要旨

近年、宇宙の科学探査や民間利用に対する人々の関心が高まっており、輸送システムの低コスト化が喫緊の課題になっている。そんな中マイクロ波ロケットが次世代低コスト化技術として注目されている。本論文は、マイクロ波ロケットの開発に向け、大気圧ミリ波放電駆動プラズマ及び衝撃波の伝播構造、伝播特性を解明するための基礎研究を10章にまとめたものである。1章は序論であり研究背景と本研究の目的を記述する。低コスト宇宙輸送システムの開発研究の状況と主題である大電力ミリ波駆動ロケットの作動原理が解説されている。2章では、100g級モデルロケットの垂直飛翔に成功した原理実証実験、3章ではkg級ロケットの水平駆動により推力を実測した研究について記述している。4～8章は本論文の中核を成し、プラズマ駆動源である大電力電磁波ビームの各種パラメータ（具体的にはビームパルスの繰り返し周波数、背景気圧、ビームのプロファイル、1パルス当たりのエネルギー、電磁波の波長）が衝撃波の伝播構造や推力に及ぼす影響を詳細に検討している。その結果、推力は1パルス当たりのエネルギーと繰り返し周波数の両方で制御可能であること、ビームプロファイルが推力に影響を及ぼしフラットなプロファイルが望ましいこと、低背景気圧では推力が減少するだけでなくプラズマや衝撃波の構造が大きく異なるため更なる調査を要することなど、マイクロ波ロケットの発展に資する新規で有用な知見が得られている。9章は考察であり、前章までの実験結果をもとにマイクロ波ロケットの推進性能を左右する要素について議論している。10章は総括および結論である。

審査会では、全審査委員からの技術的質問に対して的確な回答があり、博士としての十分な力量を見て取れた。また学位論文の基礎となる学術誌論文3編が適切であることも確認された。

以上を総合して、本論文は博士(工学)の学位論文として十分であり、合格と判定する。