

論文内容の要旨

論文題目 Energy Conversion Processes in Air-Breathing Pulse-Laser Propulsion
(大気吸込型パルスレーザー推進機におけるエネルギー変換過程)

氏名 森 浩一

大気吸込型パルスレーザー推進機におけるエネルギー変換過程に関し実験的な研究を行った。本論分は 5 章からなっており、第 1 章は、序論であり、本研究の背景となるパルスレーザー推進の原理及び特性、これまでの研究の経緯及び現状、本研究でのパルスレーザー推進機の特性量の定義及びその位置付けに関する説明がなされている。大気吸込型パルスレーザー推進機では、大気中にレーザービームが集光され、これによって空気プラズマを生成する。この空気プラズマの急激な膨張に伴って周囲に爆風波を生じ、この爆風波がノズル壁面に作用することによって推進力を得る。パルスレーザー推進機には、レーザーガンやラム・アクセラレーター等のようなマス・ドライバーとしての用途が考えられ、レーザーパルスジェット→レーザーラムジェット→レーザーロケットの 3 つの推進モードを経て、非常に高いペイロード比で宇宙空間に物資を輸送することができる。推進機駆動用の大出力レーザーとしては、炭酸ガスレーザーを挙げることができる。これは、その波長(10.6 μm)が大気中の伝播に適しており、大出力化が有望なためである。また、本章では、レーザーパルスの入射から力積の発生までの過程を、(1) レーザー加熱過程(2) 爆風波膨張過程、(3) 排気過程、(4) 吸気過程の 4 つに分割して考えることによって大気吸込型パルスレーザー推進機の一般的な相似則を導出することを提案している。これは、今日までの大気吸込型パルスレーザー推進機に関する研究では、これらの過程が明確に分離されておらず、明確な設計指針を得るに至っていなかったためである。本研究では特に、3 つの推進モードに共通でありながらも、これまでの研究では、その系統的な解明がなされて来なかった(1) レーザー加熱過程におけるエネルギー変換を調べることに力点を置いた。爆風波のエネルギーを衝撃波に囲まれる体積に含まれる内部エネルギー及び運動エネルギーの和として定義し、入射レーザーパルスエネルギーのうちレーザー爆風波のエネルギーへ変換された割合を、爆風波エネルギー変換効率として定義した。

第 2 章から第 4 章において実験方法、実験結果及びこれに基づく考察が説明されている。第 2 章では、大気のパルスレーザー加熱過程に関し、レーザー支持爆轟波(LSD 波)の支持条件を実験的に調べている。過去の研究から、レーザー吸収領域はレーザー入射方向逆向きに波状に伝播することが知られている。このレーザー吸収波には、2 つのモードがあることが知られており、1 つは熱伝導とレーザー入射の相互作用の結果としてレーザ

一入射方向逆向きに亜音速で伝播するレーザー支持燃焼(LSC)波, もう1つは, 衝撃波を伴い, 衝撃波とレーザー入射の相互作用の元で吸収が行われ, 超音速で伝播するレーザー支持爆轟波(LSD波)である. LSD波の生成によってレーザーエネルギーが効率良く爆風波のエネルギーに変換されるので, LSD波の支持条件が推進機の性能に大きな影響を及ぼすと考えられる. 大気圧空气中及び低圧空气中に集光された炭酸ガスパルスレーザーによって生成されたLSD波に対し, そのプラズマ領域及び衝撃波面の伝播をシャドウグラフ法によって可視化し, LSD波の伝播及びLSD波支持限界を調べた. その結果, LSD波支持に必要なレーザーパワー密度は, 雰囲気空気密度に対しては大きな変化を見せなかったものの, レーザーパルスのパワー, 及び減衰時定数に対しては大きく変化することがわかった. また, この実験結果を Raizer の LSD 波の伝播及び支持条件に関する理論に基づいて整理することによって, 入射レーザーパルスエネルギーのうちのLSD波に吸収されたエネルギーの割合を一意に決定する無次元パラメータを導出した. この無次元パラメータはレーザーパルスの最大パワー, 減衰時定数, 集光光学系のf値及び雰囲気密度の関数であり, その導入によって, 任意のレーザーパルス, 集光光学系, 及び雰囲気状態の下での, LSD波に吸収されるレーザーパルスエネルギーの割合を容易に計算することが可能となった. また, 本研究で主に調べたレーザーパルスのパラメータ(レーザーパルスエネルギー: 4~10 J, レーザーパルスの減衰時定数: 約1 μ s)では, 入射したレーザーパルスエネルギーの80~90%がLSD波によって吸収されており, 本研究で用いたレーザーパルス, 集光光学系, 雰囲気密度がLSD波の支持に適したものであることがわかった. これは低圧雰囲気圧においても変わらないことも示された.

第3章では投入されたレーザーパルスエネルギーに対する誘起された爆風波のエネルギーの割合(爆風波エネルギー変換効率)に関する実験結果を説明している. シャドウグラフ法による可視化により得られた衝撃波の半径の時間変化から, Sedov等による点源爆風波理論に基づく新たな解析法を用い爆風波のエネルギーを測定している. この解析法は, 従来の点源爆発理論では扱えなかった楕円的に膨張する爆風波の爆風波のエネルギーを導出することを可能にしたものである. 大気圧下での測定の結果, 爆風波エネルギー変換効率は, レーザーパルスエネルギー及び集光光学系のf値の変化に対して大きく変化することはなく, 約40%の値を得た. 一方, 雰囲気圧力及び密度の低下に伴って爆風波エネルギー変換効率は低下し, 0.2 atmの雰囲気圧の元では約20%までに低下していることがわかった. この実験のパラメータにおいては入射したレーザーパルスエネルギーのほとんどがLSD波によって吸収されており, これは低圧雰囲気圧の基でも変わらないことから, 雰囲気圧力の低下に伴ってLSD波におけるエネルギー損失が増大し, 効率の低下を招いたと考えられた. また, マッハ数2の超音速気流中においてもレーザープラズマを生成し, 爆風波エネルギー変換効率を測定した. この超音速気流では同じ静圧の元でも, 静止空气中よりも空気密度は1.8倍高く, 雰囲気の圧力及び密度に対する効率の依存性を個別に調べた. 更に, 大気圧の空气中においては, エネルギーメータを用い, レーザーの透

過エネルギー及びプラズマから輻射量の測定を行い、レーザーパルスエネルギーから爆風波のエネルギーへと変換される過程におけるエネルギーバランスを明らかにした。透過損失は、空気プラズマの点火過程において生じるものであり、一端点火した後においては、レーザーはプラズマを透過してこないことがわかった。また、透過エネルギーのレーザーパルスエネルギーに対する割合に関しても、数%程度と、エネルギーバランスに大きな寄与を及ぼすものではないことが示された。一方、プラズマからの輻射損失は投入エネルギーの約20%にも昇り、レーザー加熱過程におけるエネルギー損失機構において、プラズマからの輻射損失が大きな割合を占めていることがわかった。

第4章ではレーザーパルスの集光によって空気中に誘起された爆風波によって円錐ノズルが受ける力積を調べている。円錐ノズルの大きさ及び開口角度を系統的に変化させて力積を測定することによって、ノズル形状と力積の関係を調べた。結果として、最適ノズル長さの存在が示され、これは理論による解析と爆風波エネルギー変換効率の測定結果とによって、爆風波エネルギー変換効率及びレーザーパルスエネルギーの関数として与えられることがわかった。この理論に基づくと、ノズルの長さが最適なときにはノズルにおいて爆風波の最適膨張が達成されていることが示唆された。また、開口角度の増加に伴う力積の減少も確認され、これに関して、測定結果をCFDによる計算結果と比較した結果、開口角度の増加に伴って吸気過程における負の推力が増大してしまい、力積が低下したことが判明した。

第5章では、以上の結果をまとめている。