

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 葛山 浩

修士(工学)葛山浩提出の論文は「パルスレーザー打ち上げ機のエネルギー変換過程と飛行性能」と題し、8章から成っている。

パルスレーザー推進は、最近 Myrabo らがライトクラフトと呼ばれる実験機を高度 100m 程度まで打ち上げることに成功したことで注目を浴び、研究が盛んに行われるようになった。地上または軌道上に建設されたレーザー基地からレーザービームを用いて推進機にエネルギーを供給するため、エネルギー源を自身に搭載する必要がなく、また大気中においては、大気を吸い込んでこれを推進剤として用いる事ができるので、搭載推進剤量を減らしてペイロード比を大きくする事ができる。さらに主たるコストであるレーザー基地建設費を、ペイロードを多数回に分けて打ち上げて償還することにより、現在の打ち上げコストに比べて大幅なコストの低減が期待できる。しかし、パルスレーザー推進機の推進性能はまだ十分にわかっておらず、特に超音速飛行時の推進性能は実験的にも解析的にも明らかにされていないため、パルスレーザー打ち上げ機の実現可能性を議論するためにはまずこれを明らかにする必要がある。

本研究ではパルスレーザー単段打ち上げ機の実現可能性を検証するために、CFD により超音速飛行時の推進性能を初めて明らかにしている。また、これらの推進性能をモデル化して、パルスジェットモードからラムジェットモード、そしてロケットモードと飛行モードを切り替えながら地球静止軌道へ単段で打ち上がるパルスレーザー打ち上げ機の飛行解析を行い、十分なペイロードを軌道に運ぶことができるか検証している。さらに単位レーザーパワーあたりに打ち上げ可能な最大ペイロード重量を明らかにしている。

第1章は序論であり、研究の背景、パルスレーザー推進機の作動原理を説明し、最近のパルスレーザー推進の研究動向、過去の打ち上げシステムの提案、およびパルスレーザーの種類について概観し、本研究の目的と意義を明確にしている。

第2章では、レーザー支持爆轟波(LSD)を介したレーザーエネルギー変換過程を明らかにするため、化学反応平衡計算と Chapman-Jouguet 条件を組み込んだ平面 LSD 波モデルを構築し、エネルギー量が 10J/pulse 程度の典型的な炭酸ガスレーザーのパルス履歴を用い、点状集光系によって空气中に生じる LSD 波を解いて、レーザーから爆風波へのエネルギー変換効率(爆風波効率)を求めている。また、爆風波効率の集光系やレーザーパルス履歴への依存性を調べるため、100J/pulse 程度の典型的な炭酸ガスレーザーのパルス履歴およびライトクラフト型ノズルで使われる円環状集光系での LSD 波伝播も解き、これを点状集光系の場合の爆風波効率と比較した。結果として、高い爆風波効率を得るには、LSD 波面で LSD 閾値付近のレーザー強度をできるだけ長く維持できるようなレーザーパルス履歴および集光系が適していることを明らかにしている。

第3章では、推進性能を解析的に求めるための物理モデルおよび CFD 手法を説明している。

第4章では CFD コードの検証も兼ねてパルスジェットモードの推進性能を計算している。その結果、実験で得られた円錐ノズルパルスジェットの運動量結合係数のノズル頂角依存性を本 CFD コードによって定量的に再現できることを確認している。また、計算によって得られた推力の時間履歴と圧力等高線の変化から、ノズル頂角によって、ノズル出口で衝撃波の背後に回りこむ空気の流れが大きく変化し、

結果として運動量結合係数に大きな差が生じていることを明らかにしている。さらに、パルスジェットモードの高性能化には、小さなノズル頂角、すなわち大きなノズルアスペクト比が望ましいことを理論的に裏付けている。一方、レーザーのパルス幅が長くなると LSD 波がノズルからはみ出してしまい、運動量結合係数が低下することも指摘している。またライトクラフト型のパルスジェットモードについても計算を行い、ノズル内の複雑な爆風波伝播過程を明らかにすると共に、実験で得られたレーザーエネルギーに対する運動量結合係数の依存性も、本 CFD コードで定量的に再現できることを確認している。

第5章では、ラムジェットモードの CFD 解析を行い、超音速飛行時にも正味の推力を出すことが可能であることを、世界で初めて明らかにしている。また、高度が上がるにつれて取り込み空気流量および爆風波効率が減少するため推力は減少するが、パルスジェットモードと同様に運動量結合係数はレーザーエネルギーに依存しないことを示している。つまり運動量結合係数は大気密度と飛行マッハ数だけに依存するため、様々な飛行高度およびマッハ数において運動量結合係数を計算し、大気密度と飛行マッハ数の関数として表すことを提案している。

第6章では、ロケットモードの推進性能をモデル化するために、爆風波の相似解を用いた非定常推力発生モデルを用いている。ロケットモードで推進剤として用いられる水素雰囲気中での爆風波効率を求めるために、第2章で述べた平面 LSD 波モデルを用い、推進性能評価をより確かなものにしていく。

第7章では、パルスレーザー推進の特徴を生かし、かつレーザー基地建設費を抑えるのに最適と考えられる、地上から地球静止軌道へのほぼ垂直的な打ち上げ軌道を提案し、これまでの章で求めた各飛行モードでの運動量結合係数を用いて飛行解析を行っている。結果として0.1~0.5のペイロード比が達成可能であり、また時間平均レーザーパワーを上げるほどペイロード比は増えることを明らかにし、これはパワーが大きいほどラムジェットモードで飛行できる時間が長くなるためと述べている。しかし、打ち上げコストを考えるとレーザー基地建設費を抑えることが重要となるため、レーザーパワー最小の視点から検討している。結果として、単位レーザーパワーあたりの最大ペイロード重量は0.1kg/MWであり、そのときの最適レーザーパワーは機体初期重量あたり2.5MW/kgであると示している。さらに、この値を用いて100tonのペイロードの打ち上げを仮定して、簡単なコスト見積もりを行い、打ち上げコストが現在のコストに比べて大幅に低減される可能性があることを示唆している。

第8章は結論であり、本研究で得られた結果を要約している。

以上要するに、本論文は、パルスレーザー推進機の推進性能を解析的に明らかにし、得られた飛行性能を用いて地球静止軌道への打ち上げ飛行解析を行なって、正味のペイロード重量を運ぶことができるという実現可能性を示すと共に、打ち上げコストを最小とするレーザーパワーの最適値が存在することを明らかにしており、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。