

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 葛山 浩

宇宙開発が始まって軌道へ達するロケットが打ち上げられるようになってから 40 年あまりがたち、その間多様なミッションに対応するために様々な進化を遂げてきた。しかし、現在まで打ち上げロケットの方式として用いられてきたのは常に化学推進であった。

本研究で取り上げたパルスレーザー推進は、最近 Myrabo らが Lightcraft と呼ばれる実験機を 100m 程度打ち上げる実験をおこなっ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。パルスレーザー推進では、地上または宇宙に建設されたレーザー基地からレーザーエネルギーを推進機に伝送するため、エネルギー源を自身に搭載する必要がない。また、高濃度大気領域においては、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、推進剤搭載量を減らしてペイロード比を大きくする事ができる。さらに一度レーザー基地を建設してしまえば、機体の製作費は構造が簡潔なため安く、必要なコストは主に電気代となるため、多くの回数に分けてものを打ち上げれば、化学推進よりもコストが安くすむ可能性がある。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及び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ラムジェットモードの推進性能を明らかにした。またパルスジェットモードおよびロケットモードの推進性能もモデル化して、パルスジェット→ラムジェット→ロケットとモードを切り替えて GEO への単段打ち上げをおこなう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べるのか検証した。さらに打ち上げに必要な最小レーザーパワー及び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た。

まず第 1 章では、レーザー支持爆轟波 (LSD) を介したパルスレーザーの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、10J オーダーでの典型的な CO₂ レーザーパルス形状および一点集系での空气中を伝播する LSD 波を解き、レーザーエネルギーの爆風波エネルギーへの変換効率を求めた。このモデルでは二次元的な周囲への爆風波伝播を無視しているため、爆風波変換効率は実験値比べて半分程度の値となるが、爆風波変換効率の集光系やレーザーパルス形状の依存性は再現できる。また、100J オーダーでの典型的な CO₂ レーザーパルス形状および Lightcraft 型ノズルで使われる円環状集光での LSD 波伝播を解き、点状集光の場合と爆風波変換効率を比較した。結果として、爆風波効率を上げるためには、LSD 波面で LSD 閾値付近のレーザーパワ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形状および集光系が最適であるとわかった。

次に第3章では、CFDモデルの説明を行い、続く第4章ではCFDコードの検証もかねて、円錐ノズルパルスジェットの吸気排気過程の計算を行い、実験で得られた運動量結合係数のノズル頂角依存性をCFDによって再現することができた。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、ノズルから排出された衝撃波の背後に回りこむ空気の流れが、ノズル頂角によって大きく変化し、その後の吸気過程での運動量結合係数の回復に差を生じていることが明らかとなった。この結果、パルスジェットの高性能化のためには、小さなノズル頂角、すなわち大きなアスペクト比(ノズル長ささと出口直径の比)が望ましいことが理論的にも裏付けられた。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すことになり、結果として運動量結合係数が低下する恐れがあることが指摘された。またLightcraft型のパルスジェットモードについても計算を行い、爆風波伝播および推力履歴を調べた。さらにレーザーエネルギーに対する運動量結合係数の変化を調べ、実験値の変化傾向および値を本計算コードが再現できることが確認できた。

第5章では、Lightcraft型ラムジェットモードの数値解析を行い、超音速飛行時に正味の推力を出すことが可能であることをはじめて明らかにした。また、高度が上がると取り込み空気流量および爆風波変換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じで運動量結合係数は入力エネルギーに依存しないことがわかった。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といえため、様々な飛行高度およびマッハ数においてラムジェットモードを計算し、得られた運動量結合係数を用いて大気密度と飛行マッハ数の関数としての運動量結合係数を提案した。

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、平面LSD波モデルを用いて、水素の爆風波変換効率およびその雰囲気圧依存性を求めた。この爆風波変換効率を相似解を用いて得られたロケットモードの推力モデルに適用し、これをより確かなものにした。

第7章では、パルスレーザー推進に最適と考えられる地上から一気に増速し垂直に打ち上げるGEOへの飛行軌道を提案し、これまでの章で構築した各モードでの運動量結合係数を用いて単段打ち上げの解析を行った。結果として10~50%のペイロード比が達成可能であり、また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がわかった。これはパルスレーザー推進機では自身にエネルギー源を搭載する必要がないからである。また、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こともこの要因である。このためレーザーパワーを上げるとさらに実現性が増す。しかし、初期コストを考慮すると、レーザー基地建設費を抑えることが重要となる。このため、レーザーパワーの視点から実現可能性を検討したところ、ラムジェットモードを利用して打ち上げ可能な最小レーザーパワーは機体初期重量あたり1.47MW/kgであることがわかった。また、1MWあたり最大のペイロード重量を搭載可能な最適レーザーパワーは機体初期重量あたり2.5MW/kgであり、その時レーザーパワー1MWあたり0.1kg/MWのペイロード重量をGEOに運ぶことができると明らかになった。さらに、この値を用いて100tonの打ち上げを仮定して、簡単なコスト見積もりを行い、コストが従来型の化学ロケットに比べて大幅に低減する可能性があることを示唆した。